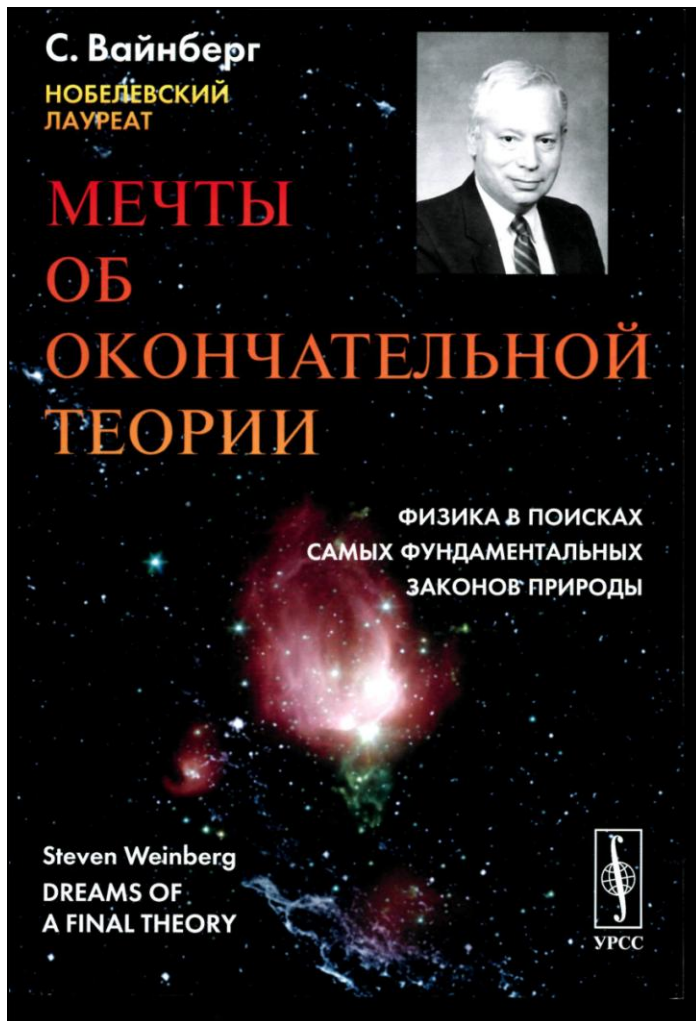


VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Сканирование и форматирование: [Янко Слава](#) (Библиотека Fort/Da) || slavaaa@yandex.ru || yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Isq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - сверху
update 07.08.06

С. Вайнберг МЕЧТЫ ОБ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ



В своей книге «Мечты об окончательной теории» Стивен Вайнберг — Нобелевский лауреат по физике — описывает поиск единой фундаментальной теории природы, которая для объяснения всего разнообразия явлений микро- и макромира не нуждалась бы в дополнительных принципах, не следующих из нее самой. Электромагнитные силы и радиоактивный распад, удержание кварков внутри нуклонов и разлет галактик — все это, как стремятся показать физики и математики, лишь разные проявления единого фундаментального закона.

Вайнберг дает ответ на интригующие вопросы: Почему каждая попытка объяснить законы природы указывает на необходимость нового, более глубокого анализа? Почему самые лучшие теории не только логичны, но и красивы? Как повлияет окончательная теория на наше философское мировоззрение?

Ясно и доступно Вайнберг излагает путь, который привел физиков от теории относительности и квантовой механики к теории суперструн и осознанию того, что наша Вселенная, быть может, сосуществует рядом с другими вселенными.

Книга написана удивительно живым и образным языком, насыщена афоризмами и остроумными эпизодами. Она распахивает читателю двери в новый мир и помогает понять то, с чем он там встретится.

С. Вайнберг
**МЕЧТЫ
ОБ
ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ
ТЕОРИИ**

Steven Weinberg
**DREAMS OF
A FINAL THEORY**



Любые замечания и предложения по изданию, а также замеченные опечатки присылайте по адресу URSS@URSS.ru. Полный список замеченных опечаток можно будет увидеть на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине:

<http://URSS.ru>

Steven Weinberg
DREAMS OF A FINAL THEORY

Vintage Books
A Division of Random House, Inc.
New York

С. Вайнберг
МЕЧТЫ ОБ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ

ФИЗИКА В ПОИСКАХ
САМЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ЗАКОНОВ ПРИРОДЫ
Перевод с английского *А. В. Беркова*
МОСКВА

УРСС



Выдержки из рецензий на книгу Стивена Вайнберга «Мечты об окончательной теории»

Вайнберг интригует читателей поразительной способностью человеческого мозга разгадывать загадки природы, а также приводит удивительные примеры научных предсказаний, оказавшихся верными. Он размышляет о том, что подразумевают, говоря «красивая теория», и почему у красивых теорий есть хорошие шансы оказаться работоспособными.

Los Angeles Times

Физическое общество не могло не возлагать большие надежды на новую книгу С. Вайнберга, одного из своих выдающихся членов. И «Мечты об окончательной теории» не разочаровали... После первого прочтения у меня возникло желание еще раз вернуться к книге. Прочитав книгу второй раз, я был сильно поражен ее утонченностью и искренностью. «Мечты об окончательной теории» заслуживают того, чтобы быть читанными и перечитанными тысячами физиков, философов и просто думающих людей.

Physics Today

Стивен Вайнберг, выдающийся физик-теоретик мирового масштаба, проявляет научную откровенность, которая граничит с агрессивностью. В своей книге он обсуждает многие сложные и неоднозначные вопросы физики элементарных частиц, и высказывает свое мнение свежим и аргументированным языком.

Boston Globe

В этой книге повествование, сюжет и авторское изложение собственной теории и выводов сплетены таким ясным образом, что читатель получает истинное удовольствие.

Science News

Великолепная книга! Вызывающая книга! Среди последних книг, написанных нобелевскими лауреатами — самая лучшая.

Boston Globe

«Мечты об окончательной теории» — хорошая книга, искренняя.

Chicago Tribune

Он выходит за упрощенческое описание экспериментаторов как занимающихся своей работой, чтобы подтвердить или опровергнуть теории, и дает нам гораздо более богатую картину того, как наука работает на самом деле.

Chicago Tribune

[Вайнберг] пишет ясно и доверительно, так что читатель проникается непреодолимым ощущением, что находится в руках мастера.

Sunday Times (London)

Об авторе

Стивен Вайнберг — лауреат Нобелевской премии по физике 1979 г. за создание теории объединения двух фундаментальных сил природы. В 1991 г. он был удостоен Национальной медали за науку, вручаемой в Белом доме. Его более ранняя книга «Первые три минуты» стала классикой научно-популярного изложения теории Большого взрыва — современного взгляда на рождение Вселенной. Среди других книг С. Вайнберга — «Теория субатомных частиц» и «Гравитация и космология: основы и приложения общей теории относительности». С. Вайнберг — член Лондонского королевского общества, Американской национальной академии наук, а также лауреат почетных званий многих национальных и зарубежных университетов.

ББК 22.312, 22.313, 22.314

Вайнберг Стивен

Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы: Пер. с англ. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 256 с.

ISBN 5-354-00526-4

В своей книге «Мечты об окончательной теории» Стивен Вайнберг — Нобелевский лауреат по физике — описывает поиск единой фундаментальной теории природы, которая для объяснения всего разнообразия явлений микро-и макромира не нуждалась бы в дополнительных принципах, не следующих из нее самой. Электромагнитные силы и радиоактивный распад, удержание кварков внутри нуклонов и разлет галактик — все это, как стремятся показать физики и математики, лишь разные проявления единого фундаментального закона.

Вайнберг дает ответ на интригующие вопросы: Почему каждая попытка объяснить законы природы указывает на необходимость нового, более глубокого анализа? Почему самые лучшие теории не только логичны, но и красивы? Как повлияет окончательная теория на наше философское мировоззрение?

Ясно и доступно Вайнберг излагает путь, который привел физиков от теории относительности и квантовой механики к теории суперструн и осознанию того, что наша Вселенная, быть может, сосуществует рядом с другими вселенными.

Книга написана удивительно живым и образным языком, насыщена афоризмами и остроумными эпизодами. Она распаивает читателю двери в новый мир и помогает понять то, с чем он там встретится.

Издательство «Едиториал УРСС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9. Лицензия ИД №05175 от 25.06.2001 г. Подписано к печати 07.09.2004 г. Формат 60х90/16. Тираж 3000 экз. Печ. л. 16. Зак. № 3-1523/696.

Отпечатано в типографии ООО «РОХОС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9

ISBN 5-354-00526-4

© Steven Weinberg, 1992

© Перевод на русский язык: Едиториал УРСС, 2004

© Оригинал-макет, оформление:

Едиториал УРСС, 2004

ИЗДАТЕЛЬСТВО УРСС

НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ E-mail: URSS@URSS.ru Каталог изданий в **Internet:** <http://URSS.ru>

Тел./факс: 7 (095) 135-42-16 Тал./факс: 7 (095) 135-42-46



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.Электронн

Электронное оглавление

Электронное оглавление	5
Оглавление.....	6
Предисловие.....	7
ГЛАВА I. Пролог.....	8
ГЛАВА II. О кусочке мела.....	13
ГЛАВА III. Похвала редукционизму	23
ГЛАВА IV. Квантовая механика и ее критики.....	27
Диалог о смысле квантовой механики.....	31
ГЛАВА V. Рассказы о теории и эксперименте	35
ГЛАВА VI. Красивые теории	48
Генри Воон. Приют	48
ГЛАВА VII. Против философии.....	59
ГЛАВА VIII. Блюзы XX века	67
ГЛАВА IX. Контуры окончательной теории	73
ГЛАВА X. На пути к цели.....	79
ГЛАВА XI. А как насчет Бога?	83
ГЛАВА XII. В округе Эллис	90
Послесловие ко второму изданию книги. Суперколлайдер один год спустя.....	95
Примечания	97
Именной указатель	110
Предметный указатель.....	116

Оглавление

Предисловие.....	6
Глава I	
Пролог	8
Глава II	
О кусочке мела.....	20
Глава III	
Похвала редукционизму.....	44
Глава IV	
Квантовая механика и ее критики.....	54
Глава V	
Рассказы о теории и эксперименте.....	73
Глава VI	
Красивые теории.....	115
Глава VII	
Против философии.....	131
Глава VIII	
Блюзы XX века.....	150
Глава IX	
Контурь окончательной теории.....	165
Глава X	
На пути к цели.....	180
Глава XI	
А как насчет Бога?.....	188
Глава XII	
В округе Эллис.....	203
Послесловие ко второму изданию книги.	
Суперколлайдер один год спустя.....	214
Примечания.....	219
Именной указатель.....	243
Предметный указатель.....	247

Предисловие

Эта книга посвящена великому интеллектуальному приключению — поиску окончательных законов природы. Мечта об окончательной теории во многом вдохновляет работы в области физики высоких энергий. Хотя мы и не знаем, как могут выглядеть окончательные законы или сколько лет пройдет, прежде чем они будут открыты, все же мы полагаем, что уже в современных теориях улавливаются проблески контуров окончательной теории.

Сама идея окончательной теории противоречива и является в наши дни предметом интенсивных споров. Это противоречие уже достигло комитетских кабинетов конгресса США: физика высоких энергий становится все более дорогой наукой и обращение ученых за общественной поддержкой частично обосновывается исторической миссией открытия окончательных законов.

С самого начала в мои намерения входило изложение тех вопросов, которые возникают в связи с самой идеей окончательной теории как части интеллектуальной истории нашего времени, рассчитанное на читателей без специальной подготовки по физике и высшей математике. В этой книге речь идет о ключевых идеях, лежащих в основе современных фундаментальных исследований по физике. Но это не учебник по физике, и читатель не встретит отдельных глав, полностью посвященных частицам, взаимодействиям, симметриям и струнам. Напротив, я впледел понятия современной физики в обсуждение того, что такое окончательная теория и как мы собираемся ее искать. Здесь я следовал собственному опыту читателя в тех областях (например, история), где *уже я* чувствую себя дилетантом. Историки часто поддаются искушению дать сначала общий рассказ о событиях, посвятив затем отдельные главы населению, экономике, технологии и пр. С другой стороны, те историки, которых читают для удовольствия, от Тацита и Гиббона до Дж. Эллиота и С. Морисона, перемежают рассказ о событиях сведениями общего характера, приводя при этом доводы в пользу тех выводов, которые они хотят донести до читателя. Работая над этой книгой, я пытался следовать их примеру и сопротивлялся искушению быть везде аккуратным. Я также не стеснялся излагать исторические или научные сведения, уже известные читателям — историкам или ученым, а также повторять эти сведения там, где я считал полезным. Как сказал однажды Энрико Ферми, никогда не следует недооценивать удовольствие, которое мы получаем, услышав что-нибудь нам уже известное.

7

Книга «Мечты об окончательной теории» состоит из трех основных частей и заключения. В первой части (главы I—III) рассказывается о самой идее окончательной теории; во второй части (главы IV—VIII) объясняется, как мы можем продвинуться в сторону построения окончательной теории; наконец, в третьей части (главы IX—XI) обсуждается вопрос о том, как эта теория может выглядеть и какое влияние на человечество окажет ее открытие. В заключительной главе XII я обсуждаю аргументы за или против строительства Сверхпроводящего суперколлайдера, нового дорогого устройства, чрезвычайно необходимого физикам — специалистам в области высоких энергий, финансирование которого находится под вопросом.

Более полное обсуждение некоторых идей, изложенных в основном тексте, читатель найдет в серии примечаний в конце книги. В ряде мест основного текста, там, где я чересчур упростил некоторые научные понятия, я дал в примечаниях более развернутые комментарии.

* * *

Я глубоко признателен Луизе Вайнберг, заставившей меня переписать первый вариант этой книги и объяснившей, как это следует сделать.

Моя искренняя благодарность Дэну Франку из *Pantheon Books* за поддержку, проницательные советы и редактирование и Нейлу Бел-тону из *Hutchinson Radius*, а также моему агенту Мортону Джанклоу за важные предложения.

Я признателен за комментарии и советы по различным вопросам: философам Полу Фейерабенду Джорджу Гейлу, Сандре Хардинг Майлсу Джексону, Роберту Нозику, Хиллари Патнем и Майклу Редхеду; историкам Стефену Брушу, Питеру Грину и Роберту Ханкинсону; юристам Филипу Боббитту Луизе Вайнберг и Марку Юдову; историкам физики Джеральду Холтону, Абрахаму Пайсу и С. Самюэлю Швеберу; физику-геологу Джону Полкинхорну; психиатрам Леону Эйзенбергу и Элизабет Вайнберг; биологам Сидни Бреннеру, Фрэнсису Крику, Лоуренсу Гильберту, Стефену Гоулду и Эрнсту Майру; физикам Якиру Ааронову Сидни Коулмену, Брайсу Де Витту, Манфреду Финку, Майклу Фишеру, Дэвиду Гроссу, Бенгту Нагелю, Стефену Орзагу. Брайану Пиппарду Джозефу Польчински, Рою Швиттерсу и Леонарду Сасскиндю; химику Роальду Хоффману; астрофизикам Уильяму Прессу Полю Шапиро и Этану Вишняку; писателям Джеймсу Глейку и Ларсу Густафсону. С их помощью мне удалось избежать многих серьезных ошибок.

Стивен Вайнберг

Остин, Техас

Август 1992

ГЛАВА I. Пролог

*Красавицы на моем пути,
Желанные и покорившие мне,
Они — мечты всего лишь о тебе...*

Джон Донн

В XX в. необычайно расширились границы научного познания в физике. Наши представления о пространстве, времени и тяготении полностью изменились благодаря специальной и общей теориям относительности Эйнштейна. Совершив еще более радикальный разрыв с прошлым, квантовая механика изменила сам язык, который мы используем для описания природы: вместо того, чтобы говорить о частицах, имеющих определенное положение и скорость, мы научились говорить о волновых функциях и вероятностях. Слияние теории относительности с квантовой механикой привело к новому видению мира, в котором вещество перестало играть главенствующую роль. Эта роль перешла к принципам симметрии, причем на данном этапе развития Вселенной некоторые из них скрыты от взгляда наблюдателя. На такой основе нам удалось построить удовлетворительную теорию электромагнетизма, а также слабых и сильных ядерных взаимодействий элементарных частиц. Часто ученые чувствовали себя как Зигфрид, который, попробовав крови дракона, с удивлением обнаружил, что может понимать язык птиц.

Но сейчас мы застряли. Годы, прошедшие с середины 1970-х, были самыми бесплодными в истории физики элементарных частиц. Мы расплачиваемся за собственные успехи: теория продвинулась так далеко, что дальнейший прогресс требует изучения процессов, происходящих при энергиях, далеко выходящих за пределы возможностей существующих экспериментальных установок.

Чтобы выйти из тупика, физики еще в 1982 г. начали планировать строительство научной установки беспрецедентных размеров и стоимости, получившей название Сверхпроводящий суперколлайдер (ССК). В этом проекте предполагается прорыть овальный туннель

9

длиной около 85 км к югу от Далласа. Тысячи сверхпроводящих магнитов, расположенных внутри этого подземного туннеля, должны заставить совершить миллионы оборотов по кольцу два встречных пучка электрически заряженных частиц — протонов, пока они не ускорятся до энергии, в двадцать раз большей, чем максимальная энергия, достижимая на существующих ускорителях. В нескольких точках вдоль кольца протоны обоих пучков будут миллионы раз в секунду сталкиваться друг с другом, а громадные детекторы, некоторые весом в десятки тысяч тонн, будут регистрировать результаты этих соударений. Стоимость проекта была оценена в 8 миллиардов долларов.

Идея постройки Суперколлайдера вызвала сильное противодействие, и не только со стороны бережливых конгрессменов, но и со стороны ряда ученых, которые хотели бы, чтобы деньги тратились на исследования именно в их области. Всегда хватало брюзжания по поводу так называемой большой науки, и мишенью многих ворчунов стал ССК. В то же время объединение европейских ученых, известное под названием ЦЕРН¹⁾, рассматривает возможность постройки похожей установки — Большого Адронного Коллайдера (БАК). Эта установка будет стоить меньше, чем ССК, так как в ней предполагается использовать уже существующий туннель, прорытый под Юрскими горами вблизи Женевы, но по ряду причин энергия частиц на этом ускорителе будет составлять менее половины той, которая планируется на ССК. Во многих отношениях споры в США по поводу ССК похожи на споры в Европе о том, стоит ли строить БАК.

Первое издание этой книги вышло в свет в 1992 г. К этому времени финансирование ССК, остановленное июньским решением Палаты представителей, было восстановлено августовским решением Сената. Будущее Суперколлайдера было бы обеспечено, если бы проект получил заметную иностранную поддержку, но пока что этим и не пахнет. Похоже, что если финансирование проекта и прорвется через конгресс в этом году²⁾, то в следующем опять возникнет угроза приостановки финансирования, и так будет каждый год, пока проект не будет завершен³⁾. Может случиться, что последние годы XX в. станут свидетелями прекращения эпохальных поисков оснований физической науки, возобновление которых произойдет, возможно, спустя много лет.

Эта книга совсем не о Суперколлайдере. Однако споры о проекте заставили меня в ряде публичных выступлений и во время слушаний в конгрессе попытаться объяснить, что же мы пытаемся выяснить, изучая элементарные частицы. Кому-то может показаться, что после

¹⁾ Centre European des Recherches Nucleaire (CERN) — Европейский Центр Ядерных Исследований. — *Прим. перев.*

²⁾ Имеется в виду 1992 г. — *Прим. перев.*

³⁾ К сожалению, судьба ССК определилась: конгресс США прекратил финансирование строительства в конце 1993 г. О последствиях этого решения подробнее будет сказано ниже. — *Прим. перев.*

10

тридцати лет работы в области физики это было для меня достаточно легко, но все оказалось не так-то просто.

Для меня самого удовольствие, получаемое от работы, всегда было достаточным основанием для того, чтобы ее делать. Сидя за своим столом или где-нибудь в кафе, я манипулирую математическими формулами и чувствую себя как Фауст, играющий в пентаграммы, прежде чем появился Мефистофель. Очень редко математические абстракции, экспериментальные данные и физическая интуиция соединяются в определенную теорию частиц, сил и симметрий. Еще реже теория оказывается правильной; иногда эксперименты подтверждают, что природа действительно следует тем законам, которые теория предсказывает.

Но это не все. Для физиков, чья деятельность связана с элементарными частицами, имеется и другая побудительная причина для работы, которую значительно труднее объяснить даже самому себе.

Существующие теории ограничены, они все еще не полны и не окончательны. Но за ними здесь и там мы улавливаем проблески окончательной теории, которая будет иметь неограниченную применимость и будет полностью удовлетворять нас своей полнотой и согласованностью. Мы ищем универсальные истины о природе и, когда мы их находим, пытаемся

объяснить их, показав, каким образом они выводятся из еще более глубоких истин. Представьте себе пространство научных принципов, заполненное стрелками, указывающими на каждый принцип и исходящими из тех принципов, которыми объясняются последующие. Эти стрелы объяснений уже сегодня выявляют любопытную структуру: они не образуют отдельных, не связанных с другими, скоплений, соответствующих независимым наукам, и они не направлены хаотично и бесцельно. Наоборот, все они связаны, так что если двигаться к началу стрелок, то кажется, что все они выходят из общей точки. Эта начальная точка, к которой можно свести все объяснения, и есть то, что я подразумеваю под окончательной теорией.

Можно уверенно утверждать, что сейчас у нас нет окончательной теории, и похоже, что она не скоро появится. Но время от времени мы ловим намеки на то, что до нее не так уж и далеко. Иногда во время дискуссий с физиками вдруг выясняется, что математически красивые идеи имеют действительное отношение к реальному миру, и тогда возникает чувство, что там, за доской, есть какая-то более глубокая истина, предвестник окончательной теории. Именно это и делает наши идеи привлекательными.

Когда мы размышляем об окончательной теории, на ум приходят тысячи вопросов и определений. Что мы имеем в виду, говоря, что один научный принцип «объясняет» другой? Откуда мы знаем, что у всех этих объяснений есть общая начальная точка? Откроем ли мы когда-нибудь эту точку? Насколько мы сейчас близки к этому? На что будет похожа окончательная теория? Какие разделы современной физики

11

выживут и сохранятся в окончательной теории? Что будет говорить эта теория о феноменах жизни и сознания? И наконец, когда мы откроем эту окончательную теорию, то что же будет дальше с наукой и с человеческим разумом? Мы лишь коснемся этих вопросов в первой главе, оставляя более подробный ответ до остальной части книги.

Мечта об окончательной теории родилась не в XX в. В западной цивилизации ее можно проследить вглубь веков до той научной школы, которая расцвела за сто лет до рождения Сократа в греческом городе Милете на берегу Эгейского моря, в устье реки Меандр. Мы, на самом деле, мало знаем о мыслях досократиков, но последующие ссылки и несколько оригинальных фрагментов, дошедших до нас, позволяют предположить, что уже милетцы искали объяснение всех природных явлений с помощью фундаментальных составляющих материи. Для Фалеса, первого среди милетских философов, фундаментальной сущностью была вода; для Анаксимена, последнего философа этой школы, такой сущностью был воздух.

В наши дни воззрения Фалеса и Анаксимена вызывают улыбку. Намного больше восхищают идеи той школы, которая возникла сто лет спустя в городе Абдере на морском берегу Фракии. Там Демокрит и Левкипп учили, что все вещество состоит из крохотных вечных частичек, названных ими атомами. (Заметим, что атомизм имеет корни в индийской метафизике, возникшей задолго до Демокрита и Левкиппа.) Эти ранние атомисты кажутся чудесным образом опередившими свое время, но, с моей точки зрения, не так уж и важно, что милетцы «ошибались», в то время как атомная теория Демокрита и Левкиппа была в определенном смысле «правильной». Ни один из досократиков, ни в Милете, ни в Абдере, не высказал никаких идей, похожих на наши современные представления о том, что означает успешное научное объяснение: *количественное* понимание явления. Далеко ли мы продвинулись бы по пути понимания того, почему природа такая, какая она есть, если бы Фалес и Демокрит говорили бы нам, что камень состоит из воды или атомов, но при этом не знали бы, как вычислить его плотность, твердость или электрическое сопротивление? Не умея делать количественные предсказания, мы при этом, конечно, никогда бы не выяснили, кто же прав — Фалес или Демокрит.

Когда мне доводилось преподавать физику в Техасе или в Гарварде для студентов-гуманитариев младших курсов, я чувствовал, что моей главной (и, безусловно, самой трудной) задачей было передать студентам ощущение могущества человека, способного детально рассчитать, что может при определенных обстоятельствах случиться с разными физическими системами. Я учил их рассчитывать отклонение катодных лучей или падение капельки масла не потому, что каждый должен обязательно уметь делать такие вещи, а потому что выполняя эти расчеты, они могут самостоятельно понять, что в действительности означают принципы физики. Наше знание принципов,

12

определяющих эти и другие явления, составляет сердцевину физической науки и драгоценную часть нашей цивилизации.

С этой точки зрения «физика» Аристотеля была не лучше, чем более ранние и менее премуудрые рассуждения Фалеса и Демокрита. В книгах «Физика» и «О небе» Аристотель описывает движение снаряда, считая его частично естественным, а частично неестественным¹. Естественное движение, как и для всех тяжелых тел, направлено вниз, к центру всех вещей, а неестественное движение сообщается воздухом, движение которого можно проследить независимо от того, что привело снаряд в движение. Но насколько быстро летит снаряд по своей траектории и как далеко он улетит, прежде чем упадет на землю? Аристотель не утверждает, что вычисления или измерения слишком трудны или что в данный момент не все еще известно о тех законах, которые могли бы привести к детальному описанию движения снаряда. На самом деле Аристотель не предлагает никакого ответа, ни правильного, ни ошибочного, потому что он не понимает, что такие вопросы стоит задавать.

А почему их стоит задавать? Читателя, как и Аристотеля, может мало заботить, с какой скоростью падает снаряд. Мне самому это безразлично. Важно то, что теперь мы знаем *принципы* — ньютоновские законы движения и тяготения, а также уравнения аэродинамики — которые точно определяют, где окажется снаряд в любой момент своего полета. Я не утверждаю, что мы на самом деле можем точно вычислить, как движется снаряд. Обтекание воздухом бесформенного камня или оперения стрелы сложно, поэтому наши вычисления будут лишь приближенными, особенно в случае турбулентных потоков воздуха. Существует и проблема определения точных начальных условий. Тем не менее мы можем использовать известные нам физические принципы для решения более простых задач, вроде движения планет в безвоздушном пространстве или стационарного обтекания воздухом шаров или пластин, и этого достаточно, чтобы убедиться, что мы действительно знаем принципы, управляющие полетом снаряда. Точно так же, мы не можем рассчитать ход биологической эволюции, но достаточно хорошо знаем теперь те принципы, которыми она управляется.

Это существенное различие, понимание которого может увязнуть в тине споров о смысле или о самом существовании окончательных законов природы. Когда мы говорим, что одна истина объясняет другую, например, физические принципы (законы квантовой механики), управляющие движением электронов в электрических полях, объясняют законы химии, мы не

обязательно подразумеваем под этим, что мы способны последовательно вывести утверждаемые нами истины. Иногда вывод удаётся завершить, как, например, в случае химических свойств очень простой молекулы водорода. Но иногда задача оказывается чересчур сложной. Подобным образом трактуя научные

13

объяснения, мы подразумеваем не то, что ученые могут реально вывести, а ту необходимость, которая заложена в самой природе. Например, даже до того, как физики и астрономы XIX в. научились учитывать взаимное притяжение планет при точном расчете их орбит, они не сомневались в том, что планеты движутся так, а не иначе, потому что их движение подчиняется законам Ньютона и закону всемирного тяготения или более точным законам, приближенной формой которых являются законы Ньютона. В наши дни, хотя мы и не можем предсказать все, что способны наблюдать химики, мы уверены, что атомы ведут себя в химических реакциях так, а не иначе, потому что физические принципы, управляющие электронами и электрическими полями, не позволяют атомам вести себя иным образом.

Это довольно запутанное место, отчасти потому, что очень трудно утверждать, что один факт объясняет другой, если ты сам не в силах проделать этот вывод. Но я думаю, что мы должны рассуждать именно таким образом, так как это и является *содержанием* нашей науки: поиск объяснений, вписывающихся в логическую структуру природы. Конечно, мы чувствуем значительно *большую* уверенность в том, что найдено правильное объяснение, если действительно способны проделать *хоть какие-нибудь* вычисления и сравнить результаты с наблюдениями, например, в случае химических свойств если уж не белков, то хоть водорода.

Хотя греки и не ставили своей целью подробное и количественное объяснение явлений природы, все же рассуждения, основанные на точных расчетах, безусловно были известны в древности. Тысячелетиями люди знали о правилах арифметики и плоской геометрии, о главнейших периодичностях в движении Солнца, Луны и звезд, включая такие тонкости, как прецессия осей вращения. Кроме того, после Аристотеля начался расцвет математики, продолжавшийся всю эллинистическую эпоху, охватывающую период времени от завоеваний ученика Аристотеля Александра Македонского вплоть до поглощения греческой цивилизации Римом. Изучая философию на младших курсах, я чувствовал некоторое раздражение, когда слышал, что греческих философов Фалеса и Демокрита называют физиками; но когда мы перешли к великим ученым эпохи эллинизма, Архимеду из Сиракуз, открывшему законы рычага, или Эратосфену из Александрии, измерившему длину земного экватора, я стал ощущать себя, как дома среди друзей-ученых. Нигде в мире не было ничего похожего на эллинистическую науку вплоть до расцвета современной науки в Европе в XVII в.

Все же, несмотря на весь блеск, эллинистическая натуральная философия и близко не приближалась к идее о свode законов, точно управляющих *всей* природой. На самом деле слово «закон» редко употреблялось в античности² (Аристотель вообще его не использовал), кроме как в первоначальном смысле человеческих или божественных

14

законов, управляющих поведением людей. (Правда, слово «астрономия» происходит от двух греческих слов: *астрон* — звезда и *номос* — закон, но этот термин был значительно менее употребителен в античное время, чем слово «астрология».) Вплоть до работ Галилея, Кеплера и Декарта в XVII в. мы не находим понятия, соответствующего современному «законам природы».

Специалист по античности Петер Грин полагает, что ограниченность греческой науки в значительной степени была обусловлена присущим грекам стойким интеллектуальным снобизмом, их предпочтением статики динамике, размышлений технологии, за исключением военных приложений^[3]. Первые три царя эллинистической Александрии поддерживали исследования полета снарядов в связи с очевидными военными приложениями, но грекам показалось бы совершенно неестественным применить точные рассуждения для решения какой-нибудь банальной задачи вроде скатывания шарика по наклонной плоскости, именно той задачи, которая высветила Галилею законы движения. В современной науке полно такого же снобизма — биологи больше занимаются генами, чем воспалением суставов, а физики скорее предпочтут изучать протон-протонные соударения при энергии 20 триллионов электрон-вольт (эВ), чем просто 20 эВ. Но это снобизм тактического порядка, основанный на мнении (правильном или ошибочном), что некоторые явления дают больше для понимания, а не на убеждении, что какие-то явления более важны, чем другие.

Современные мечты об окончательной теории берут начало от Исаака Ньютона. На самом деле количественное научное мышление никогда не прерывалось и ко времени появления Ньютона оно уже получило новый импульс, особенно в трудах Галилея. Но именно Ньютон сумел так много объяснить с помощью своих законов движения и закона тяготения, начиная с формы орбит планет и их спутников и кончая приливами и законом падения яблок, что он должен был впервые почувствовать возможности действительно последовательной объясняющей теории. Надежды Ньютона были выражены в предисловии к первому изданию его великой книги «Математические начала натуральной философии»: «Было бы желательнее вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами...». Двадцатью годами позднее, в «Оптике», Ньютон описал, как, по его мнению, могла бы осуществиться такая программа!⁴:

«Мельчайшие частички материи слепляются в результате сильнейшего притяжения, образуя частицы большего размера, но уже менее склонные к притяжению; многие из этих частиц могут опять слепляться, образуя еще большие частицы с еще меньшим притяжением друг к другу, и так далее в разных последовательностях, пока эта прогрессия не закончится на самых больших частицах, от которых зависят уже и химические реакции, и цвет естественных

15

тел, и которые образуют, наконец, тела ощутимых размеров. Если так, то в природе должны существовать посредники, помогающие частицам вещества близко слепляться друг с другом за счет сильного притяжения. Обнаружение этих посредников и есть задача экспериментальной философии».

Великий пример Ньютона породил, особенно в Англии, характерный стиль научного объяснения: вещество полагалось состоящим из крошечных неделимых частиц; частицы действуют друг на друга с «различными силами», одной из разновидностей которых является сила тяготения; зная положения и скорости этих частиц в любой момент времени, и зная, как вычислить силы, действующие между ними, можно воспользоваться законами движения, чтобы предсказать, где они окажутся в любой последующий момент. До сих пор новичкам часто преподают физику в таком духе. К сожалению,

несмотря на все успехи ньютоновского стиля рассуждений, это был тупиковый путь.

Мир все-таки сложная штука. Чем больше узнавали ученые о химии, свете и электричестве в XVIII и XIX вв., тем более неосуществимой должна была казаться возможность объяснения этих явлений в ньютоновском духе. В частности, для того чтобы объяснить химические реакции и химическое сродство элементов, рассматривая атомы как ньютоновские частицы, движущиеся под действием сил взаимного притяжения и отталкивания, физики вынуждены были делать столько дополнительных предположений об атомах и силах, что реально ничего нельзя было довести до конца.

Несмотря на это к 1890-м гг. многими учеными овладело странное чувство завершенности науки. В научном фольклоре сохранилась апокрифическая история о каком-то физике, который объявил в конце столетия, что физика практически завершена и все, что осталось, это провести измерения с точностью до нескольких следующих знаков после запятой. Похоже, что эта история восходит к замечанию, сделанному в 1894 г. американским физиком-экспериментатором Альбертом Майкельсоном в речи в Чикагском университете: «Хотя и рискованно утверждать, что будущее Физической Науки не хранит в себе чудес, еще более поразительных, чем открытые в прошлом, вполне вероятно, что большинство важнейших основополагающих принципов уже надежно установлено и что дальнейшие успехи возможны, главным образом, на пути поиска строгих приложений этих принципов ко всем явлениям, привлекающим наше внимание... Один видный физик заметил, что будущее Физической Науки следует искать в шестом знаке после запятой». Присутствовавший в зале во время выступления Майкельсона другой американский физик-экспериментатор Роберт Милликен предположил⁵, что «видный физик», которого имел в виду Майкельсон, был влиятельный шотландец Уильям Томсон, лорд Кельвин. Один приятель⁶ говорил мне, что когда он был студентом Кембриджа в конце 1940-х гг., он часто слышал приписываемое Кель-

16

вину высказывание, что в физике не будет никаких новых открытий, и все, что осталось — это делать все более точные измерения.

Я не смог обнаружить подобного высказывания в собрании речей лорда Кельвина, но имеется достаточно других свидетельств широко распространенного, хотя и не всеобщего, ощущения завершенности науки⁷ к концу девятнадцатого столетия. Когда молодой Макс Планк поступал в 1875 г. в Мюнхенский университет, профессор физики Филипп Джолли отговаривал его заниматься наукой. По мнению Джолли, уже нечего было открывать. Милликен получил тот же совет. Он вспоминал: «В 1894 г. я жил на пятом этаже в доме на Шестьдесят четвертой улице в западной части Бродвея с четырьмя другими аспирантами Колумбийского университета, одним медиком и тремя будущими социологами и политологами, и все время подвергался с их стороны нападкам за то, что я занимаюсь „конченным“, да, именно „дохлым делом“ — физикой, в то время как сейчас открываются новые „живые“ области общественных наук».

Часто эти примеры самодовольства ученых XIX в. приводятся как предупреждение тем из нас в двадцатом столетии, кто осмеливается рассуждать об окончательной теории. Но это искажает смысл тех самоуверенных высказываний. Майкельсон, Джолли и соседи Милликена, возможно, и не задумались о том, что природа химического притяжения уже была успешно объяснена физиками, а еще менее о том, что механизмы наследования были уже успешно объяснены химиками. Те, кто высказывались подобным образом, могли так говорить только потому, что они перестали верить в мечту Ньютона и его последователей о том, что химию и другие науки можно объяснить с точки зрения законов физики, для них химия и физика были равноправными науками, причем каждая близкой к завершению. Какой бы широко распространенной не была точка зрения о завершенности науки в конце XIX в., она свидетельствовала лишь о самоуспокоенности, которая сопутствует угасанию амбиций.

Но дела стали быстро меняться. Для физиков XX в. начался в 1895 г., когда Вильгельм Рентген неожиданно открыл рентгеновские лучи. Важны были не рентгеновские лучи сами по себе; скорее, их открытие воодушевило физиков и заставило их поверить, что есть еще вещи, которые можно открыть, особенно, если изучать разного рода излучения. И открытия быстро последовали одно за другим. В Париже в 1896 г. Анри Беккерель открыл радиоактивность. В Кембридже в 1897 г. Дж. Дж. Томсон измерил отклонение катодных лучей электрическим и магнитным полями и интерпретировал свои результаты как свидетельство существования фундаментальной частицы — электрона, входящей в состав всякого вещества, а не только катодных лучей. В Берне в 1905 г. Альберт Эйнштейн (еще не будучи членом академического сообщества) представил новый взгляд на пространство и время в своей специальной теории относительности, предложил новый спо-

17

соб демонстрации существования атомов и объяснил более раннюю работу Макса Планка о тепловом излучении, введя понятие о новой элементарной частице — световой корпускуле, названной позднее фотоном. Чуть позже, в 1911 г., Эрнест Резерфорд на основании результатов экспериментов с радиоактивными элементами, выполненных в Манчестерской лаборатории, сделал вывод, что атомы состоят из маленького массивного ядра, окруженного облаком электронов. Наконец, в 1913 г. датский физик Нильс Бор использовал эту модель атома и идею Эйнштейна о фотонах для объяснения спектра простейшего атома водорода. Самоуспокоенность сменилась возбуждением; физики почувствовали, что окончательная теория, объединяющая по крайней мере всю физическую науку, может быть скоро построена.

Уже в 1902 г. ранее вполне удовлетворенный Майкельсон смог заявить: «Скоро наступит день, когда нити, идущие от кажущихся совершенно далекими друг от друга областей знания, соединятся в одной точке. Тогда природа атомов, происхождение сил, действующих в химических соединениях, взаимодействие этих атомов с невидимым эфиром, проявляющееся в явлениях электричества и магнетизма, структура молекул и молекулярных соединений, состоящих из атомов, объяснение трения, упругости и тяготения — все это сольется в единое и компактное тело научного знания»⁸!. Хотя до этого Майкельсон полагал, что физика уже завершена, так как он не думал, что физика должна объяснять химию, то теперь он уже ожидал совершенно иного завершения науки в ближайшем будущем, включающего как физику так и химию.

Все эти высказывания были несколько преждевременными. На самом деле мечта об окончательной объединяющей теории начала вырисовываться в середине 1920-х гг. после открытия квантовой механики. Вместо частиц и сил ньютоновской механики в физике возник совершенно новый подход, использующий понятия волновых функций и вероятностей. Неожиданно квантовая механика позволила рассчитать не только свойства отдельных атомов и их взаимодействие с излучением, но и свойства атомов, объединенных в молекулы. Наконец-то стало ясно, что химические

явления таковы, каковы они есть, благодаря электрическим взаимодействиям электронов и атомных ядер.

Не следует думать, что курсы лекций по химии в колледжах начали читать профессора физики или что Американское Химическое общество вошло в состав Американского Физического общества. Чтобы вычислить силу связи двух атомов водорода в простейшей молекуле водорода, используя уравнения квантовой механики, нужно преодолеть заметные трудности; чтобы иметь дело со сложными молекулами, особенно с теми, которые связаны с биологией, и понимать, как они будут реагировать в разных условиях, нужны особый опыт и интуиция химика. Однако успех квантовой механики в расчете свойств очень простых молекул сделал очевидным тот факт, что химические явле-

18

ния обусловлены физическими законами. Поль Дирак, один из основоположников новой квантовой механики, торжествуя объявил в 1929 г., что «наконец-то полностью известны основополагающие физические законы, необходимые для построения математической теории большей части физики и всей химии, и единственная трудность заключается в том, что в результате применения этих законов мы приходим к слишком сложным для решения уравнениям»⁹.

Вскоре возникла новая странная проблема. Первые квантовомеханические расчеты энергий атомов дали результаты, находившиеся в хорошем согласии с опытом. Но когда квантовую механику начали использовать для описания не только электронов в атомах, но и порождаемых этими электронами электрических и магнитных полей, оказалось, что энергия самого атома равна бесконечности! В других вычислениях появились другие бесконечности, так что в течение четырех десятилетий этот абсурдный результат представлялся главным тормозом на пути прогресса физики. В конце концов проблема бесконечностей оказалась совсем не такой ужасной, более того, она стала одним из главных аргументов, прибавивших оптимизма в отношении возможности построения окончательной теории. Если должным образом позаботиться об определении масс, электрических зарядов и других констант, все бесконечности взаимно уничтожаются, но только в теориях *специального* вида. Поэтому можно думать, что математика подвела нас к какой-то части окончательной теории, поскольку это единственный способ избежать появления бесконечностей. На самом деле новая загадочная теория струн может быть уже указывает тот единственный путь, который позволяет избежать бесконечностей при объединении теории относительности (включая общую теорию относительности, т. е. эйнштейновскую теорию тяготения) с квантовой механикой. Если это так, то нам известна уже значительная часть окончательной теории.

Я совсем не имею в виду, что окончательная теория будет выведена из чистой математики. Помимо всего прочего, почему мы должны верить, что теория относительности, равно как и квантовая механика, логически неизбежны? Мне кажется, что самое большее, на что можно надеяться, это построить окончательную теорию как очень жесткую структуру, которая не может быть превращена в какую-то немного отличающуюся теорию без появления логически абсурдных результатов вроде бесконечных энергий.

Еще один повод для оптимизма связан с тем странным фактом, что прогресс в физике часто основан на суждениях, которые можно охарактеризовать только как эстетические. Это очень удивительно. Каким образом ощущение физика, что одна теория красивее другой, может служить проводником в научном поиске? Этому есть несколько возможных причин, но одна из них относится конкретно к физике элементарных частиц: красота наших сегодняшних теорий

19

может быть «всего лишь грезой» о той красоте, которая ожидает нас в окончательной теории.

В XX в. именно Альберт Эйнштейн был наиболее одержим идеей построения окончательной теории. Как пишет его биограф Абрахам Пайс, «Эйнштейн — типичная старозаветная личность, по примеру Иеговы уверенная, что миром правит закон, и его нужно найти»¹⁰. Последние тридцать лет жизни Эйнштейна были большей частью потрачены на поиски так называемой единой полевой теории, которая должна была объединить теорию электромагнетизма Джеймса Клерка Максвелла с общей теорией относительности, т. е. теорией тяготения Эйнштейна. Попытки Эйнштейна не увенчались успехом, и задним числом мы можем сказать, что они были ошибочны. Дело не только в том, что Эйнштейн пренебрег квантовой механикой; круг рассматриваемых им явлений был слишком узок. Электромагнетизм и гравитация являются единственными фундаментальными силами, проявляющимися в повседневной жизни (и единственными силами, известными в те времена, когда Эйнштейн был молодым человеком), но существуют и другие силы в природе, включая слабые и сильные ядерные силы. Прогресс, достигнутый на пути объединения, заключался на самом деле в том, что максвелловская теория электромагнитных сил объединилась с теорией слабых ядерных сил, а не с теорией тяготения, для которой решить проблему с бесконечностями значительно труднее. Тем не менее битва Эйнштейна стала нашей сегодняшней битвой. Это и есть поиск окончательной теории.

Разговоры об окончательной теории очень раздражают некоторых философов и ученых. Появляются обвинения в чем-то ужасном, вроде редукционизма или, еще хуже, физического империализма. Частично, это реакция на разного рода глупости, которые могут быть связаны с окончательной теорией, например, на утверждение, что открытие такой теории в физике будет означать конец науки. Конечно, с появлением окончательной теории не будут прекращены ни научные исследования вообще, ни чисто научные изыскания, ни даже чисто научные изыскания в физике. Чудесные явления, от турбулентности до феномена сознания, будут нуждаться в объяснении, даже если окончательная теория будет построена. Более того, открытие этой теории в физике совсем не обязательно поможет прогрессу в понимании упомянутых явлений. Окончательная теория будет окончательной лишь в одном смысле — она станет концом определенного типа науки, а именно восходящего к древности поиска таких фундаментальных основ мироздания, которые нельзя объяснить с помощью еще более глубоких принципов.

ГЛАВА II. О кусочке мела

Шут: ...Любопытна причина, по которой в семизвездье семь звезд, а не больше.

Лир: Потому что их не восемь?

Шут: Совершенно верно. Из тебя вышел бы хороший шут...

В. Шекспир. Король Лир¹⁾. Акт 1, сцена 5

Ученые сделали множество необычных и прекрасных открытий. Возможно, самым прекрасным и самым необычным из них является открытие структуры самой науки. Наши научные достижения — не разрозненный набор изолированных фактов; одно научное обобщение находит свое объяснение в другом, которое в свою очередь вытекает из следующего. Проследив эти стрелки объяснений назад к их источникам, мы обнаруживаем поразительную сходящуюся структуру. Может быть, это и есть глубочайшая из всех истин, постигнутых нами при изучении Вселенной.

Рассмотрим кусочек мела. Это вещество знакомо большинству людей (особенно физикам, которые общаются друг с другом с помощью доски), но я выбрал мел в качестве примера потому, что он явился в свое время объектом полемики, ставшей знаменитой в истории науки. В 1868 г. Ассоциация британских ученых проводила свое ежегодное собрание в большом городе Норвич, главном городе графства на востоке Англии. Для ученых и студентов, собравшихся в Норвиче, это было волнующим событием. В те годы внимание общественности было привлечено к науке не только из-за ее очевидной важности для развития техники, но в еще большей степени из-за того, что наука изменяла взгляды людей на мир и их место в нем. Публикация девятью годами ранее сочинения Дарвина «О происхождении видов

¹⁾ Перевод Б. Пастернака.

21

путем естественного отбора» резко противопоставила науку доминирующей религии того времени. На собрании присутствовал Томас Генри Хаксли — выдающийся анатом и яростный спорщик, которого современники прозвали «бульдогом Дарвина». Как это часто бывало и ранее, Хаксли воспользовался случаем, чтобы выступить перед гражданами города. Он назвал свою лекцию «О кусочке мела!»¹¹⁾.

Я представляю себе Хаксли стоящим на трибуне и держащим в руках кусочек мела, может быть отломанный им от тех залежей, которые простираются под городом Норвичем, или одолженный у знакомого плотника, а может, у какого-нибудь профессора. Он начал свою лекцию с описания того, как слой мела на глубине в несколько сотен футов простирается не только под большей частью Англии, но и под всей Европой и странами Леванта, вплоть до Центральной Азии. Мел в основном состоит из простого химического вещества, называемого на современном языке карбонатом кальция, однако микроскопическое исследование показывает, что в нем содержится бесчисленное множество скелетов крохотных существ, населявших те древние моря, которые покрывали когда-то Европу. Хаксли живо описывал, как в течение миллионов лет эти скелетики оседали на дно моря и спрессовывались в мел, как то здесь, то там в эти отложения попадали скелеты более крупных животных, похожих на крокодила, причем при переходе к более глубоким слоям мела эти животные выглядят все более непохожими на своих современных потомков, и следовательно они должны были эволюционировать все те миллионы лет, пока мел оседал.

Хаксли пытался убедить присутствующих, что мир гораздо старше, чем те шесть тысяч лет, которые отведены ему последователями Библии, и что новые живые существа появлялись и эволюционировали с самого начала. Все эти утверждения сейчас общеприняты — никто, имеющий хоть малейшее представление о науке, не сомневается в большом возрасте Земли или реальности эволюции. То, что я хочу обсудить, не имеет никакого отношения к конкретному разделу научного знания, а относится к тому, как все эти знания связаны друг с другом. Именно поэтому я, как и Хаксли, начну с кусочка мела.

Мел белый. *Почему?* Один ответ, который можно дать сразу, таков: мел белый потому, что он не какого-то другого цвета. Такой ответ безусловно понравился бы лировскому шуту, но на самом деле он не так уж далек от истины. Уже во времена Хаксли знали, что каждый цвет в радуге связан со светом определенной длины волны — более длинные волны соответствуют красному концу спектра, более короткие — голубому. Белый свет рассматривался как смесь света многих разных цветов. При падении света на непрозрачное вещество вроде мела только часть его отражается, а другая часть поглощается. Вещество определенного цвета, например зелено-синего, присущего многим соединениям меди (медно-алюминиевые фосфаты в турмалине) или

22

синего, характерного для соединений хрома, имеет такой цвет потому, что вещество поглощает свет строго определенных длин волн; цвет, который мы видим в свете, отраженном от вещества, связан со светом тех длин волн, которые поглощаются *не слишком сильно*. Оказывается, что карбонат кальция, из которого и состоит мел, особенно сильно поглощает свет только в области инфракрасных и ультрафиолетовых длин волн, все равно не видимых глазом. Поэтому свет, отраженный от куска мела, имеет практически такое же распределение по длинам волн видимого света, как и свет, падающий на мел. Благодаря этому и возникает ощущение белизны, будь то у мела, облака или снега.

Почему? Почему некоторые вещества сильно поглощают видимый свет определенных длин волн, а другие нет? Оказывается, ответ связан со сравнительными энергиями атомов и света. Ученые начали понимать это после работ Альберта Эйнштейна и Нильса Бора, сделанных в первые два десятилетия XX в. Эйнштейн в 1905 г. впервые понял, что световой луч состоит из потока колоссального количества частиц, позднее названных *фотонами*. У фотонов нет ни массы, ни электрического заряда, но каждый фотон обладает определенной энергией, величина которой обратно пропорциональна длине волны света. В 1913 г. Бор предположил, что атомы и молекулы могут существовать только в определенных *состояниях*, т. е. стабильных конфигурациях, обладающих определенной энергией. Хотя атомы часто сравнивают с миниатюрными Солнечными системами, все же существует принципиальное различие. Любой планете Солнечной системы можно придать чуть больше или чуть меньше энергии, просто подвинув ее чуть дальше от Солнца или, наоборот, придвинув к нему. Но состояния атома *дискретны* — мы не можем изменять энергии атомов иначе, как на определенную конечную величину. Обычно атом или молекула находятся в состоянии с наименьшей энергией. Но, поглощая свет, они перескакивают

из состояния с наименьшей энергией в одно из состояний с большей энергией (при испускании света происходит обратный процесс). Если объединить идеи Эйнштейна и Бора, то получается, что свет может поглощаться атомом или молекулой, только если длина волны света принимает определенное значение. Эти определенные длины волн отвечают таким энергиям фотонов, которые как раз равны разности энергий между начальным состоянием атома или молекулы и одним из состояний с большей энергией. В противном случае при поглощении фотона атомом или молекулой не сохранялась бы энергия. Типичные соединения меди имеют зелено-синий цвет, потому что существует определенное состояние атома меди, обладающее энергией, на два электрон-вольта²⁾ большей, чем энергия нормального состояния атома. Поэтому атом особенно

²⁾ Мы будем использовать общепринятую единицу измерения энергии **электронвольт (эВ)**. Такую энергию получает электрон, если его проталкивает по проводу батарейка напряжением 1 В.

23

легко перепрыгивает в состояние с большей энергией, поглотив фотон с энергией 2 эВ. Длина волны такого фотона равна 0,62 мкм, что соответствует красно-оранжевому цвету, так что после поглощения этого фотона оставшийся отраженный свет имеет зелено-синий оттенок¹². (Приведенное рассуждение — не просто крайне сложный способ объяснить то, что мы и так знаем про зелено-синий цвет соединений меди; подобная структура энергетических состояний атомов меди проявляется и тогда, когда они получают извне энергию другими способами, например, от пучка электронов.) Мел имеет белый цвет потому что у молекул, из которых он состоит, оказывается, нет таких уровней энергии, куда можно легко перепрыгнуть, поглощая фотоны любого цвета из видимого света.

Почему? Почему атомы и молекулы существуют только в дискретных состояниях, обладающих определенной энергией? Почему эти энергии такие, а не другие? Почему свет состоит из отдельных частиц, энергия которых обратно пропорциональна длине волны света? И почему атомы или молекулы особенно легко перепрыгивают в определенные состояния, поглощая фотоны? Все эти свойства света, атомов и молекул было невозможно понять вплоть до середины 1920-х гг., когда был развит новый подход в физике, известный как квантовая механика. В рамках квантовой механики частицы в атоме или молекуле описываются так называемой волновой функцией. Эта функция ведет себя в чем-то похоже на волну света или звука, но ее значение (точнее, значение ее квадрата) определяет вероятность обнаружения частицы в любом данном месте. Точно так же, как воздух в органной трубе может колебаться только в определенных модах, каждая из которых имеет свою длину волны, так и волновая функция частицы в атоме или молекуле может существовать только в определенных модах или квантовых состояниях, каждое из которых имеет свою определенную энергию. Когда уравнения квантовой механики применили для рассмотрения атома меди, обнаружилось, что один из электронов на далекой внешней орбите этого атома слабо связан и в результате поглощения видимого света может быть легко переброшен на следующую более высокую орбиту. Квантовомеханические вычисления показали, что энергии атома в этих двух состояниях отличаются на два электрон-вольта, что как раз равно энергии фотона красно-оранжевого света³⁾. С другой стороны, у молекул карбоната кальция в куске мела нет подобных слабосвязанных электронов, которые могли бы поглотить фотоны какой-нибудь длины волны. Что же касается фотонов, то их свойства объясняются применением принципов квантовой механики к самому свету. Оказывается, что свет,

³⁾ В металле эти внешние электроны отрываются от отдельных атомов и путешествуют между ними, так что чисто металлическая медь не проявляет особой тенденции поглощать фотоны именно оранжевого цвета, поэтому сама медь не выглядит зелено-голубой.

24

как и атомы, может существовать только в определенных квантовых состояниях с определенной энергией. Например, красно-оранжевый свет длиной волны 0,62 мкм может существовать только в состояниях с энергиями, равными нулю или 2, 4, 6 и т. д. эВ, которые мы интерпретируем как состояния без фотонов или содержащие один, два, три и т.д. фотонов, энергия каждого из которых равна 2 эВ.

Почему? Почему уравнения квантовой механики, определяющие поведение частиц в атомах, таковы, каковы они есть? Почему вещество состоит из этих частиц, электронов и атомных ядер? Почему в этом веществе возникает излучение света? Большая часть этих вопросов была довольно загадочной и в 1920-е, и в 1930-е гг., когда квантовая механика была впервые применена для описания атомов и света. Достаточное понимание пришло лишь около пятнадцати лет тому назад⁴⁾ в связи с успешным развитием так называемой **стандартной модели** элементарных частиц и сил. Ключевым предварительным условием этого нового понимания было объединение в 1940-х гг. квантовой механики с другой революционной теорией в физике XX в. — эйнштейновской теорией относительности. Принципы теории относительности и квантовой механики почти несовместимы друг с другом и могут сосуществовать лишь в рамках очень узкого класса теорий. В рамках нерелятивистской квантовой механики 1920-х гг. можно было вообразить почти любой характер сил, действующих между электронами и ядрами, но в релятивистской теории, как мы увидим, это не так: силы, действующие между частицами, могут возникать только за счет обмена другими частицами. Более того, вообще все частицы представляют собой сгустки энергии или **кванты** полей разного сорта. Поле, например электрическое или магнитное, есть некий вид напряжения в пространстве, напоминающий разные виды напряжений, возможные в твердом теле, с той разницей, что поле есть напряжение самого пространства. Каждому сорту элементарных частиц соответствует свой тип поля: в рамках стандартной модели имеется электронное поле, квантами которого являются электроны; электромагнитное поле (состоящее из электрического и магнитного полей), квантами которого являются фотоны; однако не существует поля, соответствующего атомным ядрам или частицам (протонам и нейтронам), из которых ядра составлены, но есть поля разных типов частиц, называемых кварками, из которых состоят протоны и нейтроны; есть и еще несколько полей, на которых мы сейчас останавливаться не будем. Уравнения полевой теории типа стандартной модели описывают поведение не частиц, а полей; частицы возникают как проявления этих полей. Обычная материя состоит из электронов, протонов и нейтронов просто по той причине, что все другие массивные частицы чудовищно нестабильны. Считается, что

⁴⁾ Речь идет о событиях конца 1970-х гг. — **Прим. перев.**

25

стандартная модель что-то объясняет не потому, что она представляет собой набор каких-то собранных в кучу обрывков,

работающих по неизвестным причинам. На самом деле структура стандартной модели в значительной степени фиксируется начальным выбором набора полей, входящих в теорию, и общими принципами (вроде принципов теории относительности и квантовой механики), которые управляют взаимодействием этих полей.

Почему? Почему мир состоит только из этих полей, а именно полей кварков, электронов, фотонов и т.п.? Почему их свойства такие, как предполагается в стандартной модели? И почему именно для этой материи природа подчиняется принципам теории относительности и квантовой механики? К сожалению, ответов на эти вопросы пока нет. Комментируя современное положение дел в физике, теоретик из Принстона Дэвид Гросс перечисляет открытые вопросы: «Теперь, когда мы понимаем, как все это работает, мы начинаем спрашивать себя, а почему существуют именно кварки и лептоны, почему структура материи повторяется в трех поколениях кварков и лептонов, почему все силы обязаны своим происхождением локальным калибровочным симметриям? Почему, почему, почему?»¹³ (Используемые Гроссом понятия объясняются в следующих главах нашей книги.) Именно надежда когда-нибудь найти ответ на эти вопросы и делает занятие физикой элементарных частиц столь увлекательным.

Общеизвестно, что слово «почему» имеет весьма неопределенный смысл. Философ Эрнст Нагель приводит десять вариантов вопросов, в которых это слово употребляется в десяти разных смысловых значениях¹⁴, например: «Почему лед плавает на воде?», «Почему Кассий организовал убийство Цезаря?» и «Почему у людей есть легкие?». На ум приходят и другие примеры, в которых слово «почему» употребляется в ином смысле, скажем, «Почему я родился?» В последнем примере использование слова «почему» похоже по смыслу на его использование во фразе «Почему лед плавает на воде?» и не предполагает какой-либо осознанной цели.

Но даже и в этом случае довольно сложно точно сказать, что же делает человек, пытаясь ответить на такой вопрос. К счастью, в этом нет необходимости. Научное объяснение есть некий способ поведения, доставляющий нам такое же удовольствие, как любовь или искусство. Наилучший способ понять, что же такое научное объяснение, это испытать особое чувство воодушевления, возникающее тогда, когда кто-нибудь (лучше всего, вы сами) добивается реального объяснения какого-то явления. Я совсем не имею в виду что можно заниматься научными объяснениями без всяких правил. Здесь существуют такие же ограничения, как в любви и в искусстве. Во всех трех случаях есть общепринятые истины, которые следует уважать, хотя, конечно, эти истины совершенно различны в науке, любви и искусстве. Я также не утверждаю, что совсем не интересно попытаться

26

описать, как устроена наука, но думаю, что для работы в науке это не нужно, точно так же, как это не нужно в искусстве и в любви.

Как я уже упоминал, всякое научное объяснение имеет дело с дедукцией, выводом одной истины из другой. Но в объяснении заключено, с одной стороны, нечто большее, чем просто дедукция, а с другой стороны, нечто меньшее. Простой вывод одного утверждения из другого с помощью законов логики не обязательно содержит объяснение, и это ясно видно в тех случаях, когда оба утверждения могут быть выведены друг из друга. Эйнштейн пришел к заключению о существовании фотонов в 1905 г., исходя из успешной теории теплового излучения, предложенной пятью годами ранее Максом Планком; девятнадцать лет спустя Сатендра Нат Бозе показал, что теорию Планка можно вывести из эйнштейновской теории фотонов. Объяснение, в противоположность выводу, дает поразительное ощущение *направления*. У нас возникает захватывающее чувство, что фотонная теория света более фундаментальна, чем любое другое утверждение, касающееся теплового излучения, и поэтому именно она является объяснением свойств такого излучения. Точно так же Ньютон вывел свои знаменитые законы, частично пользуясь ранее установленными законами Кеплера, описывающими движение планет Солнечной системы¹⁵, но тем не менее мы утверждаем, что законы Ньютона объясняют законы Кеплера, но не наоборот.

Разговоры о более фундаментальных истинах очень нервнируют философов. Можно сказать, что более фундаментальные истины это те, которые в определенном смысле более всеобъемлющи, но и здесь трудно дать точные формулировки. Однако ученые оказались бы в плохом положении, если бы ограничились использованием только тех понятий, которые уже получили удовлетворительное философское объяснение. Ни один работающий физик не сомневается, что законы Ньютона более фундаментальны, чем законы Кеплера, или что теория фотонов Эйнштейна более фундаментальна, чем теория теплового излучения Планка.

И все же научное объяснение может быть и чем-то меньшим, чем дедукция, так как мы можем утверждать, что какой-то факт объясняется некоторым принципом, хотя мы не в силах вывести этот факт из данного принципа. Используя законы квантовой механики, мы *можем* вывести различные свойства простейших атомов и молекул и даже оценить уровни энергии сложных молекул, вроде молекул карбоната кальция в меле. Химик из Беркли Генри Шефер говорит, что «при разумном применении общепринятых методов теоретической физики ко множеству задач о поведении молекул, даже таких больших, как молекула нафталина, получаемые результаты можно рассматривать точно так же, как добытые в заслуживающем доверия эксперименте»¹⁶. И все же никто реально не смог решить уравнений квантовой механики и вывести детальный вид волновой функции или точное значение

27

энергии такой действительно сложной молекулы, как молекула белка. Тем не менее мы ничуть не сомневаемся, что правила квантовой механики «объясняют» свойства таких молекул. Частично такая уверенность базируется на том, что с помощью квантовой механики можно рассчитать детальные свойства простейших систем, вроде молекул водорода, а частично — на том, что у нас есть математические правила, позволяющие вычислить все свойства любой молекулы с любой желаемой точностью, если только предоставить нам достаточно мощный компьютер и достаточное количество машинного времени.

Иногда мы вправе говорить, что можем что-то объяснить, даже если не уверены, что когда-либо сможем это вывести с помощью дедукции. До сих пор мы не знаем, как использовать стандартную модель элементарных частиц для вычисления детальных свойств атомных ядер, и у нас нет уверенности, что мы когда-нибудь узнаем, как сделать такие вычисления, даже имея в своем распоряжении компьютеры неограниченной мощности¹⁷. (Это связано с тем, что силы, действующие внутри ядер, слишком велики, чтобы можно было использовать определенные вычислительные приемы, хорошо работающие в

случае атомов или молекул.) И все же мы не сомневаемся, что свойства атомных ядер таковы, каковы они есть, потому что нам известны принципы стандартной модели. В данном случае слова «потому что» не имеют ничего общего с нашей способностью реально вывести что-то, а отражают лишь наши взгляды на устройство природы.

Людвиг Витгенштейн, отрицавший саму возможность объяснения какого-либо факта с помощью любого другого факта, предупреждал, что «в основе всего современного взгляда на мир лежит иллюзорная точка зрения, что так называемые законы природы представляют собой объяснения естественных явлений»¹⁸. Подобные предупреждения мало меня трогают. Говорить физику, что законы природы не являются объяснениями природных явлений, это все равно, что внушать тигру, преследующему добычу, что нет разницы между мясом и травой. То, что мы, ученые, не знаем, как объяснить в приемлемой для философов форме, что же мы на самом деле делаем, занимаясь поисками научных объяснений, не означает, что то, что мы делаем, совершенно бесполезно. Конечно, мы можем пользоваться помощью философов-профессионалов, чтобы понять, что мы делаем, но с ней или без нее мы будем делать одно и то же.

Похожую цепочку «почему?» можно выстроить для любого физического свойства куска мела — для его хрупкости, плотности, сопротивления электрическому току. Но попробуем проникнуть в лабиринт объяснений через другой вход, рассматривая химию мела. Как говорил Хаксли, мел главным образом состоит из карбоната кальция. Хотя Хаксли этого прямо и не утверждал, он, вероятно, знал, что это химическое соединение состоит из элементов кальция, углеро-

28

да и кислорода в совершенно определенных весовых пропорциях, соответственно, 40, 12 и 48%.

Почему? Почему мы обнаруживаем, что кальций, углерод и кислород образуют именно это химическое соединение только в таких пропорциях, и не существует других соединений, содержащих такие же элементы во многих других возможных пропорциях? Ответ был найден химиками XIX в. с помощью атомной теории, причем до того, как были получены прямые экспериментальные свидетельства существования атомов. Веса атомов кальция, углерода и кислорода относятся как 40 : 12 : 16, а молекула карбоната кальция состоит из одного атома кальция, одного атома углерода и *трех* атомов кислорода, так что отношение весов этих элементов в карбонате кальция как раз равно 40 : 12 : 48.

Почему? Почему атомы разных элементов имеют те значения веса, которые мы наблюдаем, и почему молекулы состоят из совершенно определенного количества атомов каждого сорта? Уже в XIX в. знали, что число атомов каждого сорта в молекулах, подобных карбонату кальция, определяется числом электрических зарядов, которым обмениваются друг с другом атомы в молекуле. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон обнаружил, что носителями этих электрических зарядов являются отрицательно заряженные частицы, названные электронами. Эти частицы много легче, чем атомы в целом, и именно они перемещаются по проводам в обычных электрических цепях, когда течет ток. Элементы отличаются друг от друга числом электронов в атоме: один у водорода, шесть у углерода, восемь у кислорода, двадцать у кальция и т. д. Когда к атомам, из которых состоит мел, применили законы квантовой механики¹⁹, то выяснилось, что атомы кальция и углерода охотно отдают, соответственно, два и четыре электрона, а атом кислорода легко подхватывает два электрона. Таким образом, три атома кислорода в каждой молекуле карбоната кальция могут подхватить шесть электронов, предоставляемых одним атомом кальция и одним атомом углерода; баланс сходится. Электрические силы, порождаемые этим обменом электронов, и удерживают молекулу от развала на составные части. А что можно сказать об атомных весах? После работ Резерфорда в 1911 г. мы знаем, что почти вся масса атома содержится в маленьком положительно заряженном ядре, вокруг которого обращаются электроны. После некоторых затруднений, к 1930 г. физики поняли, что атомное ядро состоит из двух сортов частиц, имеющих почти одинаковые массы, а именно из протонов с положительным электрическим зарядом, равным по величине отрицательному заряду электрона, и нейтронов, не имеющих заряда. Ядро атома водорода состоит из одного протона. Число протонов должно всегда равняться числу электронов²⁰, чтобы атом оставался нейтральным, а нейтроны нужны потому, что сильное притяжение между ними и протонами существенно для удержания ядра от развала. Нейтроны и протоны весят

29

почти одинаково, а вес электронов много меньше, так что с хорошей точностью можно считать, что вес всего атома просто пропорционален полному числу протонов и нейтронов в его ядре: один (протон) у водорода, двенадцать у углерода, шестнадцать у кислорода и сорок у кальция. Эти цифры соответствуют атомным весам, которые были известны, но не имели объяснения во времена Хаксли.

Почему? Почему существуют протон и нейтрон, заряженная и нейтральная частицы почти одинаковой массы и много тяжелее электрона? Почему они притягиваются друг к другу с такой силой, что им удается образовать атомные ядра, в сотни тысяч раз меньшие по размерам, чем сами атомы? Объяснение всему этому вновь содержится в сегодняшней стандартной модели элементарных частиц. Легчайшие кварки имеют названия *u* и *d* (от слов *up* и *down*), их заряды равны $+2/3$ и $-1/3$ (в единицах, где заряд электрона принят равным -1); протоны состоят из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка и поэтому имеют заряд $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$; нейтроны состоят из одного *u*-кварка и двух *d*-кварков, так что их заряд равен $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$. Массы протона и нейтрона почти равны, так как они порождаются главным образом большими силами, удерживающими кварки вместе, а эти силы одинаковы для *u*- и *d*-кварков. Электрон много легче, так как он не испытывает воздействия этих сил. Все кварки и электроны являются сгустками энергии различных полей и их свойства вытекают из свойств соответствующих полей.

Итак, мы опять столкнулись со стандартной моделью. На самом деле *любые* вопросы о физических или химических свойствах карбоната кальция сходятся через цепочку «почему?» к одной общей точке: к современной квантово-механической теории элементарных частиц, т. е. к стандартной модели. Но физика и химия — очень легкие предметы. Что, если взять что-нибудь позаковыристей, например биологию?

Наш кусочек мела не является идеальным кристаллом карбоната кальция, но в то же время это и не бесформенная каша из отдельных молекул, как в газе. Как объяснял Хаксли в своей лекции в Норвиче, мел состоит из скелетов крохотных живых существ, которые при жизни поглощали из воды древних морей соли кальция и углекислый газ и использовали эти химические вещества как сырье для строительства маленьких оболочек из карбоната кальция вокруг своих нежных тел. Не нужно особого воображения, чтобы понять, зачем им это потребовалось, — море не самое безопасное место для

беззащитных комочков белка. Но это само по себе не объясняет, почему растения и животные развили в себе органы вроде оболочки из карбоната кальция, помогающие им выжить; нуждаться не значит иметь. Ключ к пониманию этого нашли Дарвин и Уоллес, для популяризации и защиты работ которых столь много сделал Хаксли. В живых существах происходят наследуемые изменения, иногда благоприятные, иногда не очень. Те организмы, которым посчастливилось претерпеть

30

благоприятные изменения, имеют больше шансов выжить и передать эти полезные характеристики своему потомству. Но откуда берутся эти изменения и почему они наследуются? Ответ на эти вопросы был наконец дан в 1950-е гг. и свелся к раскрытию структуры очень большой молекулы ДНК, которая служит шаблоном для построения белков из аминокислот. Молекула ДНК образует двойную спираль, хранящую генетическую информацию, зашифрованную последовательностью химических структур вдоль каждой из нитей спирали. Генетическая информация передается в тот момент, когда двойная спираль расщепляется и каждая из двух ее нитей воспроизводит собственную копию; наследуемые изменения возникают тогда, когда по случайным причинам изменяются те химические структурные единицы, из которых построена нить спирали.

Раз мы спустились на уровень химии, то остальное уже довольно ясно. Конечно, ДНК слишком сложна, чтобы мы могли для объяснения ее структуры использовать уравнения квантовой механики. Но эта структура достаточно успешно объясняется обычными законами химии, и никто не сомневается, что будь у нас достаточно мощный компьютер, мы смогли бы в принципе объяснить все свойства ДНК, решив уравнения квантовой механики для электронов и ядер нескольких обычных химических элементов, свойства которых, в свою очередь, объясняются стандартной моделью. Итак, мы опять оказались в той же общей точке всех наших стрелок объяснений.

Я пока что не касался важного отличия биологии от физических наук, а именно присутствия элемента историзма. Если под «мелом» мы подразумеваем «вещество, из которого состоят белые скалы в Дувре» или «предмет в руках Хаксли», тогда утверждение, что мел состоит на 40 % из кальция, на 12 % из углерода и на 48 % из кислорода должно объясняться смесью универсальных и исторических причин, включающих события, происходившие в истории нашей планеты или в жизни Томаса Хаксли. Те утверждения, которые мы надеемся объяснить с помощью окончательных законов природы, относятся к типу универсальных. Одной из таких универсалий является утверждение, что (при достаточно низких температуре и давлении) существует химическое соединение, состоящее из кальция, углерода и кислорода точно в тех пропорциях, которые указаны выше. Мы полагаем, что такие утверждения верны везде во Вселенной и в любые моменты времени. Точно так же можно высказать универсальные утверждения о свойствах ДНК, однако существование живых существ на Земле, использующих ДНК для передачи случайных изменений от поколения к поколению, зависит от определенных исторических событий: есть такая планета как Земля; жизнь и обмен генетической информацией как-то начались; было достаточно времени на эволюцию.

Не только биология содержит элемент историзма. Это же верно и в отношении многих других наук, например геологии и астроно-

31

мии. Возьмем еще раз наш кусочек мела и спросим, откуда на Земле взялись достаточные запасы кальция, углерода и кислорода, чтобы обеспечить сырье для постройки защитных панцирей, из которых потом образовался мел? Ответ прост — этих элементов полно во Вселенной. Но почему это так? Мы вновь должны апеллировать к смеси универсальных и исторических принципов. Мы знаем, как использовать стандартную модель элементарных частиц, чтобы проследить ход ядерных реакций в рамках общепринятой модели «Большого взрыва» Вселенной и вычислить, что материя, сформировавшаяся за первые несколько минут существования Вселенной, состояла на три четверти из водорода и на одну четверть из гелия и содержала лишь ничтожные следы других элементов, главным образом очень легких (например, лития). Это и было тем сырьем, из которого позднее в недрах звезд образовались более тяжелые элементы. Расчеты последующего хода ядерных реакций в звездах показывают, что больше всего возникло тех элементов, ядра атомов которых наиболее прочны. Среди таких элементов есть кальций, углерод и кислород. Звезды выбрасывают вещество в межзвездную среду за счет разного рода процессов, включающих звездный ветер и взрывы сверхновых. Звезды второго поколения, вроде Солнца и его планет, как раз и образовались из этого межзвездного вещества, обогащенного элементами, входящими в состав мела. Но такой сценарий все же зависит от предположения исторического характера, а именно что действительно произошел более или менее однородный Большой взрыв, в котором образовалось около десяти миллиардов фотонов на каждый кварк. Было предпринято множество попыток объяснить такое предположение в рамках возможных космологических теорий, однако сами эти теории базируются на других предположениях исторического характера.

Неясно, всегда ли сохранится различие между универсальными и историческими элементами в наших науках. Современная квантовая механика, так же как и механика Ньютона, ясно отличает условия, описывающие начальное состояние системы (не имеет значения, подразумевается ли вся Вселенная или только ее часть), от законов, управляющих последующей эволюцией этой системы. Однако возможно, что когда-нибудь начальные условия возникнут как часть законов природы. Простой пример того, как это может быть, дает так называемая теория стационарной Вселенной, предложенная в конце 1940-х гг. Германом Бонди и Томасом Голдом, а также (в несколько ином варианте) Фредом Хойлом. В этой модели все галактики разбегаются друг от друга (это иногда выражают несколько неточно словами, что Вселенная расширяется⁵⁾), но несмотря на это происходит не-

⁵⁾ Слова, что Вселенная расширяется, могут ввести в заблуждение, так как ни планетные системы, ни галактики, ни само пространство не расширяются. Галактики разлетаются друг от друга точно так же, как разлеталось бы любое облако частиц, получивших первоначальный толчок, отбрасывающий их друг от друга.

32

прерывное рождение материи, которая заполняет расширяющиеся межгалактические пустоты с такой скоростью, что Вселенная поддерживается в неизменном состоянии и выглядит всегда одинаково. У нас нет приемлемой теории того, как могло бы происходить такое непрерывное рождение материи, но вполне возможно, что если бы подобная теория у нас была, мы смогли бы с ее помощью показать, что расширение Вселенной происходит с такой равновесной скоростью, что рождение материи в точности компенсирует расширение. Это напоминало бы экономическую теорию, согласно которой цены сами подстраиваются так, чтобы предложение уравновесило спрос. В такой теории стационарной Вселенной нет нужды в

начальных условиях, так как нет самого начала, а вместо этого факт существования Вселенной можно вывести из условия, что она не меняется.

Первоначальная версия космологии стационарной Вселенной была достаточно надежно исключена благодаря разным астрономическим наблюдениям, главным среди которых было открытие в 1964 г. микроволнового излучения, как полагают, оставшегося от того времени, когда Вселенная была много плотнее и горячее. Может быть, теория стационарной Вселенной возродится при переходе к большим масштабам в какой-нибудь будущей космологической теории, которая будет рассматривать сегодняшнее расширение Вселенной всего лишь как флуктуацию в вечной, в среднем неизменной, но постоянно флуктуирующей Вселенной. Существуют и более тонкие возможности, что начальные условия когда-нибудь смогут быть выведены из окончательных законов. Джеймс Хартль и Стивен Хокинг предложили один такой вариант, в рамках которого слияние физики и истории объясняется применением законов квантовой механики ко Вселенной в целом. В наши дни квантовая космология вызывает большие споры среди ученых; концептуальные и математические проблемы очень сложны, и пока что не видно, что нам удалось продвинуться к каким-то определенным выводам.

В любом случае, если начальные условия возникновения Вселенной должны быть включены в законы природы или если их можно вывести из этих законов, все равно практически мы никогда не сможем исключить элементы историзма и случайности из таких наук, как биология, геология или астрономия. Даже в очень простой системе может возникнуть явление, называемое *хаосом*, препятствующее всем попыткам предсказать будущее этой системы. В хаотической системе почти одинаковые начальные условия через какое-то время приводят к совершенно разным результатам. Возможность возникновения хаоса в простых системах была известна еще в начале XX века; математик и физик Анри Пуанкаре показал, что хаос может развиваться даже в такой простой системе, как центральная звезда и две ее планеты. Уже давно установлено, что темные щели в кольцах Сатурна возникли как раз в тех местах, откуда любая вращающаяся вокруг

33

планеты частица выбрасывается благодаря своему хаотическому движению. Новым и удивительным в изучении хаоса стало не открытие, что этот хаос существует, а то, что определенные виды хаотических движений демонстрируют почти универсальные свойства, поддающиеся математическому анализу.

Существование хаотического движения не означает, что поведение системы вроде колец Сатурна не до конца определяется законами движения и тяготения и начальными условиями, а означает лишь то, что мы не можем рассчитать практически эволюцию некоторых явлений во времени (например, орбиты частиц в темных щелях колец Сатурна). Несколько более строго, существование хаоса в системе означает, что при любой точности, с которой мы задаем начальные условия, неизбежно наступит момент времени, после которого мы потеряем всякую возможность предсказать, как будет вести себя система. При этом все же остается верным утверждение, что в какой бы далекий момент времени в будущем мы ни захотели предсказать поведение физической системы, подчиняющейся законам Ньютона, существует определенная точность задания начальных условий, при которой мы способны это сделать. (Приведем такую аналогию: всякий автомобиль, едущий по дороге, когда-нибудь сожжет весь бензин в баке, сколько бы мы его туда ни залили, и все же, как бы далеко мы ни хотели попасть, всегда существует то достаточное количество бензина, которое позволит нам доехать до нужного места.) Иными словами, открытие явления хаоса не отвергает детерминизм доквантовой физики, но заставляет нас быть чуть более аккуратными в рассуждениях о том, что мы понимаем под этим словом. В квантовой механике нет детерминизма в смысле механики Ньютона; соотношение неопределенностей Гейзенберга говорит нам, что нельзя одновременно точно измерить положение и скорость частицы, и даже если мы произведем все возможные в один и тот же момент времени измерения, мы можем только предсказать вероятности результатов этих измерений в любой последующий момент времени. Все же мы увидим ниже, что даже в квантовой механике в определенном смысле поведение любой физической системы полностью определяется начальными условиями и законами природы.

Конечно, каким бы ни был этот детерминизм, он мало помогает, когда мы сталкиваемся с реальными непростыми системами вроде биржи или жизни на Земле. Вторжение исторических случайностей постоянно ограничивает объем того, что мы когда-либо можем надеяться объяснить. Всякое объяснение нынешних форм жизни на Земле не может не учитывать вымирание динозавров шестьдесят пять миллионов лет тому назад, которое в наши дни объясняется столкновением Земли с кометой. Но никто никогда не сможет объяснить, почему комета столкнулась с Землей именно тогда. Самые смелые надежды ученых заключаются в том, что мы сможем протянуть це-

34

почку объяснений всех явлений природы до окончательных законов и исторических случайностей.

Вторжение в науку исторических случайностей означает также, что нам следует быть очень внимательными в отношении того, какого же типа объяснения мы хотим получить от окончательных законов. Например, когда Ньютон впервые сформулировал свои законы движения и тяготения, послышались возражения, что эти законы не объясняют одну из главных особенностей Солнечной системы, а именно что все планеты вращаются вокруг Солнца в одну сторону. Сейчас мы понимаем, что это явление связано с историей. То, как планеты вращаются вокруг Солнца, есть следствие того, как Солнечная система сконденсировалась из вращающегося газового диска. Мы и не должны ожидать, что можно вывести это только из законов движения и тяготения. Разделение законов и исторических событий — деликатное дело, и мы учимся этому все время.

Вполне возможно, что те явления, которые мы рассматриваем сейчас как произвольные начальные условия, в конце концов смогут быть выведены из универсальных законов, но и наоборот, вполне возможно, что принципы, которые мы *сейчас* считаем универсальными законами природы, в конце концов окажутся историческими случайностями. В последнее время ряд физиков-теоретиков забавляется идеей, что тот объект, который мы обычно называем Вселенной, а именно расширяющийся рой галактик, простирающийся во всех направлениях по крайней мере на десятки миллиардов световых лет, есть на самом деле «субвселенная», маленькая часть значительно большей «Мегавселенной», состоящей из множества таких частей, причем в каждой из них те величины, которые мы называем мировыми константами (электрический заряд электрона, отношение масс элементарных частиц и т. п.), могут иметь разные значения. Возможно даже, что те утверждения, которые мы называем законами природы, меняются при переходе от одной субвселенной к другой. В этом случае те объяснения значений констант и законов, которые найдены нами, могут включать неустранимый элемент историзма, а именно то, что по

случайности мы находимся в определенной субвселенной, которую и населяем. Даже если в этих идеях окажется что-то разумное, я все же не думаю, что нам надо будет расстаться с мечтами об открытии окончательных законов природы; эти законы могут оказаться мегазаконами, определяющими вероятности нахождения в субвселенных разного типа. Сидни Коулмен и другие уже храбро попытались вычислить эти вероятности, применив законы квантовой механики ко всей Мегавселенной. Я хочу подчеркнуть, что все подобные идеи очень спекулятивны, не до конца математически сформулированы и пока что не имеют никакой экспериментальной поддержки.

До сих пор я обсуждал две проблемы, возникающие при обсуждении цепочки объяснений, ведущих к окончательным законам:

35

вторжение исторических случайностей и сложность, не дающую нам возможности что-то реально объяснить, даже если мы рассматриваем только универсалии, свободные от элементов историзма. Но есть еще одна требующая обсуждения проблема, связанная со словом «возникновение». Когда мы рассматриваем явления природы на все более сложных уровнях, мы обнаруживаем возникновение явлений, не имеющих аналогов на более простых уровнях, и уж тем более на уровне элементарных частиц. Например, нет ничего похожего на разум на уровне отдельных живых клеток и ничего похожего на жизнь на уровне атомов и молекул. Идея возникновения была хорошо схвачена физиком Филиппом Андерсоном в названии его статьи в 1972 г.: «Чем больше, тем разнообразнее»²¹. Внезапное возникновение новых явлений на высоком уровне сложности наиболее очевидно в биологии и науках о поведении, но следует подчеркнуть, что такое возникновение не есть специфика жизни или социального поведения; такое случается и в самой физике.

В физике исторически наиболее важным примером возникновения новых качеств является термодинамика, наука о теплоте. В первоначальной формулировке, данной в XIX в. Карно, Клаузиусом и другими, термодинамика выглядела как автономная наука, не выводимая из механики частиц и сил, а построенная на новых понятиях температуры и энтропии, не имеющих аналогов в механике. Только первый закон термодинамики, закон сохранения энергии, перекидывал мостик между механикой и термодинамикой. Центральным принципом термодинамики был второй закон, согласно которому (в одной из формулировок) физические системы обладают не только энергией и температурой, но и определенной величиной, называемой энтропией²², которая всегда растет со временем в любой замкнутой системе, достигая максимума, когда система приходит в состояние равновесия²³. Именно этот принцип запрещает Тихому океану передать такое количество тепловой энергии Атлантическому, чтобы Тихий океан замерз, а Атлантический закипел; подобный катаклизм не нарушил бы закона сохранения энергии, но он запрещен, так как уменьшил бы энтропию.

Физики XIX в. воспринимали второй закон термодинамики как аксиому, сформулированную на основании опыта и столь же фундаментальную, как и любой другой закон природы. В те времена это казалось разумным. Термодинамика, похоже, успешно применялась в самых разнообразных ситуациях, начиная от поведения пара (та задача, которая породила саму термодинамику) и кончая замерзанием, кипением и химическими реакциями. (В наши дни мы могли бы добавить более экзотические примеры; астрономы обнаружили, что мириады звезд в шаровых скоплениях в нашей и других галактиках ведут себя как газы при определенной температуре, а в работах Бекенштейна и Хокинга было теоретически показано, что черные дыры обладают энтропией, пропорциональной площади поверхности

36

дыры.) Если термодинамика столь универсальна, то как можно ее логически связать с физикой определенных типов частиц и сил?

Затем, во второй половине XIX в., в работах нового поколения физиков-теоретиков (включая Джеймса Клерка Максвелла в Шотландии, Людвиг Больцмана в Германии и Джосайи Уилларда Гиббса в Америке) было показано, что принципы термодинамики можно на самом деле математически вывести, анализируя вероятности различных конфигураций систем определенного типа, в которых энергия распределяется среди очень большого числа подсистем. Так происходит, например, в газе, энергия которого распределяется среди образующих газ молекул. (Эрнст Нагель приводит этот пример как образец сведения одной теории к другой²⁴.) В рамках такой статистической механики тепловая энергия газа является просто кинетической энергией его частиц; энтропия есть мера беспорядка в системе; второй закон термодинамики выражает тенденцию изолированной системы становиться все более неупорядоченной. Переток теплоты из всех океанов в Атлантический привел бы к увеличению порядка, и именно поэтому так не происходит.

Какое-то время, в период между 1880-м и 1890-м гг., происходила настоящая битва между теми, кто поддерживал новую статистическую механику, и теми, кто, как Макс Планк и химик Вильгельм Оствальд, продолжали утверждать логическую независимость термодинамики²⁵. Эрнст Цермело пошел еще дальше и пытался доказать, что, поскольку в рамках статистической механики уменьшение энтропии маловероятно, но все же возможно, те предположения о молекулах, на которых построена статистическая механика, не могут быть верными. Эта битва была в конце концов выиграна последователями статистической механики, после того как в начале XX в. всеми была признана реальность атомов и молекул. Тем не менее, даже получив объяснение в терминах частиц и сил, термодинамика продолжает иметь дело с такими понятиями, как температура и энтропия, теряющими всякий смысл на уровне отдельных частиц.

Термодинамика это скорее способ рассуждений, а не часть универсального физического закона; когда мы ее применяем, мы всегда можем уверенно пользоваться одними и теми же принципами. Но объяснение того, почему термодинамика применима к любой конкретной системе²⁶, принимает форму вывода, использующего методы статистической механики и отталкивающегося от деталей устройства системы, а это неизбежно опять приводит нас на уровень элементарных частиц. Если воспользоваться картиной стрелок объяснений, которую я уже применял выше, то термодинамику можно рассматривать как определенную систему таких стрелок, снова и снова возникающих в очень разных физических обстоятельствах, но где бы они не возникли, всегда с помощью методов статистической механики можно проследить, как они сходятся к более глубоким законам и в конце

37

концов к принципам физики элементарных частиц. Как показывает этот пример, применимость научной теории для выяснения очень широкого круга явлений совершенно не означает автономность ее от более глубоких физических законов.

То же утверждение верно и в других областях физики, например в связанных между собой явлениях хаоса и турбулентности. Физики, работающие над этими проблемами, обнаружили, что снова и снова, в самых разных ситуациях, повторяются одни и те же типы поведения системы; например, считается, что в турбулентном потоке жидкости любого сорта распределение энергии по отдельным завихрениям разного размера универсально, идет ли речь о турбулентности приливной волны на гавайском пляже или о турбулентности, возникшей в межзвездном газе в результате пролета звезды. Однако не все потоки жидкости турбулентны, и даже если турбулентность возникла, она не всегда проявляет эти «универсальные» свойства. Каковы бы ни были математические соображения, приводящие к выводу об универсальных свойствах турбулентности, нам все равно надлежит объяснить, *почему* эти соображения применимы к любому конкретному турбулентному потоку а этот вопрос неизбежно требует ответа, включающего как случайности (скорость приливной волны или форма трубы, по которой течет жидкость), так и универсальные закономерности (свойства воды и законы движения жидкости), которые в свою очередь должны быть объяснены с помощью более глубоких законов.

Аналогичные рассуждения применимы и к биологии. В этом случае большая часть того, что мы наблюдаем, зависит от исторических случайностей, но есть несколько приближенно универсальных закономерностей, вроде правила биологии популяций, утверждающего, что особи мужского и женского рода имеют тенденцию рождаться в равных количествах. (В 1930 г. генетик Рональд Фишер объяснил, что если только в сообществе возникает тенденция производить, скажем, больше мужских, чем женских особей, то каждый ген, ответственный за то, что особь чаще рождает самок, а не самцов, начинает распространяться по всей популяции, так как несущие этот ген женские потомки встречают меньше конкуренции при поисках пары.) Подобные правила применимы к широкому кругу популяций. Можно думать, что они верны даже для жизни на других планетах, если только она воспроизводится половым путем. Аргументы, приводящие к этим правилам, одни и те же, идет ли речь о людях, птицах или инопланетянах. Однако рассуждения всегда покоятся на определенных предположениях о рассматриваемых организмах, и если мы зададимся вопросом, почему эти предположения следует считать правильными, мы должны будем искать ответ частично в исторических случайностях, а частично в универсальных закономерностях, вроде структуры ДНК (или того, что ее заменяет на других плане-

38

тах), что в свою очередь находит объяснение в физике и химии, а следовательно в стандартной модели элементарных частиц.

В этом месте мои рассуждения могут показаться несколько туманными, так как в реальной работе в области термодинамики, динамики жидкостей или биологии популяций ученые используют языки, специфичные для каждой конкретной области исследований, и говорят об энтропии, вихрях или стратегии репродукции, а не об элементарных частицах. Это происходит не только потому, что мы реально не можем использовать наши исходные принципы для расчета сложных явлений; это есть еще и отражение того, какого типа вопросы мы хотим задать об этих явлениях. Даже если бы у нас был чудовищных размеров компьютер, который мог бы проследить историю каждой элементарной частицы в приливной волне или в теле плодовой мушки, все горы компьютерных вычислений вряд ли пригодились бы тому, кто хотел всего лишь узнать, есть ли завихрения в потоке воды или жива ли мушка.

Нет причин предполагать, что сближение научных объяснений должно приводить к сближению научных методов. Термодинамика, хаос и биология популяций будут каждая использовать свой собственный язык и развиваться по своим собственным правилам, что бы мы не узнали об элементарных частицах. Как говорит химик Рональд Хоффман, «большая часть полезных химических представлений... неточна. Но если свести их к физике, они вообще исчезают»²⁷. Атакуя тех, кто пытается свести химию к физике, Ганс Примас перечисляет ряд полезных понятий химии, для которых велика опасность исчезнуть при такой редукции: валентность, структура связей, локализованные орбитали, ароматичность, кислотность, цвет, запах, растворимость в воде!²⁸ Я не вижу причин, почему химики должны перестать употреблять эти понятия, если они находят их полезными или интересными. Но тот факт, что они продолжают это делать, не должен вызывать сомнений в другом факте, что все эти понятия химии имеют тот смысл, который в них вкладывается, благодаря лежащим в их основе законам квантовой механики электронов, протонов и нейтронов. Как подчеркивал Лайнус Полинг, «нет ни одного раздела химии, который не зависел бы в своих фундаментальных основах от квантовых принципов»²⁹.

Из всех разделов знания, которые мы пытаемся связать с принципами физики с помощью стрелок объяснений, наибольшую трудность вызывает проблема сознания. Мы ведь сразу постигаем наши собственные мысли, без всякого вмешательства чувств, так как же можно рассматривать сознание в рамках физики и химии? Физик Брайан Пиппард, занимавший кресло Максвелла в качестве Кавендишевского профессора в Кембриджском университете, выразил это так: «Вот уж что действительно невысказано, так это то, что физик-теоретик, даже обладая компьютером неограниченной мощности, должен вы-

39

вести из законов физики, будто какая-то сложная структура уверена в своем существовании»³⁰.

Должен сознаться, что эти вопросы для меня ужасно трудны и я не обладаю необходимой специальной подготовкой. Все же я не согласен с Пиппардом и многими другими учеными, занимающими те же позиции. Ясно, что здесь мы имеем дело с тем, что литературовед назвал бы предметным коррелятом к сознанию. Я наблюдаю, что физические и химические изменения у меня в мозгу и в теле соотносятся (и как причина, и как следствие) с изменениями в моих сознательных мыслях. Я смеюсь, когда чем-то обрадован; мой мозг проявляет разную электрическую активность, когда я сплю и когда бодрствую; сильные эмоции управляют количеством гормонов в моей крови; кроме того, я иногда произношу вслух свои мысли. Все это еще не сознание в чистом виде; я никогда не смогу выразить с помощью смеха, волн мозговой активности, гормонов или слов, что значит чувствовать, что ты грустен или весел. Но оставим на минутку сознание в стороне. Разумно считать, что эти предметные корреляты к сознанию могут изучаться научными методами и в конечном счете могут быть объяснены через физику или химию мозга и тела. (Не надо понимать слово «объяснены» так, что мы можем предсказать все или почти все. Но мы способны понять, почему смех, мозговые волны и гормоны производят тот или иной эффект. Точно так же мы не можем предсказать погоду в следующем месяце, хотя и понимаем, как и чем эта погода определяется.)

В родном университете Пиппарда, Кембридже, есть группа биологов, возглавляемых Сиднеем Бреннером, которая

полностью установила схему нервной системы маленького червя из семейства нематод *C. elegans*, так что теперь ученые в некотором смысле знают ответ на любой вопрос о том, почему этот червь ведет себя так, а не иначе. (Что до сих пор не удается построить, так это основанную на схеме программу, которая имитирует наблюдаемое поведение червя.) Конечно, червь это не человек. Но между ними есть непрерывный ряд животных со все усложняющейся нервной системой, всякие там жалящие насекомые, рыбы, мыши и человекообразные обезьяны. Где же провести черту?³¹

Предположим все же, что мы придем к пониманию предметных коррелятов к сознанию в терминах физики (включая сюда и химию) и поймем также путь их развития к теперешнему состоянию. Не так уж бессмысленно надеяться, что когда предметные корреляты к сознанию будут поняты, то где-то в наших объяснениях можно будет выделить нечто, какую-то физическую систему для переработки информации, которая будет соответствовать нашим представлениям о сознании, будет тем, что Гильберт Райль назвал «духом в машине»³². Может быть, это и не будет полным объяснением сознания, но чем-то очень близким.

40

Нет никаких гарантий, что прогресс в других областях науки будет обязательно сопровождаться чем-то новым в области физики элементарных частиц. Но (я повторяю это не в последний раз) меня заботит здесь не столько то, чем занимаются ученые, поскольку это отражает как ограниченные возможности, так и интересы людей, сколько логический порядок, встроенный в саму природу. Именно в этом смысле можно говорить, что разделы физики вроде термодинамики и другие науки вроде химии и биологии основаны на более глубоких законах, в частности на законах физики элементарных частиц.

Говоря здесь о логическом порядке в природе, я молчаливо принял, как сказали бы историки или философы, позицию «реалиста», причем не в использующемся каждодневно смысле трезвомыслящего, лишённого иллюзий человека, а в значительно более древнем смысле человека, верящего в реальность абстрактных идей. Средневековый реалист верил в реальность универсалий, например платоновских форм, в противоположность номиналистам, вроде Уильяма Оккама, который объявлял их не более чем простыми именами. (Мое использование слова «реалист» порадовало бы одного из моих любимых авторов, викторианца Джорджа Гиссинга, который хотел, чтобы «слова реализм и реалист никогда более не употреблялись, дабы сохранить их истинный смысл в писаниях философов-схоластов»³³.) Несомненно, я не собираюсь здесь вступать в споры на стороне Платона. Я хочу лишь подчеркнуть здесь реальность законов природы, в противоположность современным позитивистам, считающим реальностью только то, что можно измерить.

Когда мы говорим, что вещь реальна, мы просто выражаем по отношению к ней определенную степень уважения. Мы полагаем, что к этой вещи надо относиться серьезно, так как она может воздействовать на нас не вполне контролируемым образом, и узнать о ней что-то новое можно, только попытавшись выйти за рамки нашего мысленного представления об этой вещи. Это, например, верно по отношению к стулу на котором я сижу (любимый пример философов), и свидетельствует не столько о реальности самого стула, сколько о том, что мы имеем в виду, когда говорим, что стул реален. Как физик, я воспринимаю научные объяснения и законы как вещи, которые таковы, каковы они есть, и которые нельзя выдумать, поэтому мое отношение к этим законам не так уж отличается от моего отношения к стулу. Поэтому я жалую законам природы (по отношению к которым сегодняшние законы — всего лишь приближения) честь быть реальными. Такая точка зрения только укрепляется, когда оказывается, что некоторые законы природы совсем не такие, как мы о них думали. Наши ощущения при этом близки к тем, которые мы испытываем, когда, пытаясь сесть, обнаруживаем, что под нами нет стула. Правда, я должен признать, что моя готовность присвоить титул «реальный» законам природы несколько напоминает готовность Ллойда

41

Джорджа раздавать направо и налево аристократические титулы; это показывает, как мало значения я этому придаю.

Дискуссия о реальности законов природы может стать менее академичной, если нам удастся вступить в контакт с другими разумными существами с далеких планет, которые также ищут научные объяснения явлениям природы. Окажется ли, что они открыли те же самые законы? Ясно, что любые открытые ими законы были бы сформулированы на совершенно незнакомом языке и в непривычных обозначениях, но мы все же смогли бы спросить, есть ли хоть какое-нибудь соответствие между их законами и нашими. Если бы это оказалось так, было бы трудно отрицать объективный характер этих законов.

Конечно, мы не знаем, что было бы на самом деле, но здесь на Земле, пусть в малом масштабе, мы уже получили ответ на аналогичный вопрос. Так случилось, что современная физическая наука родилась в Европе в конце XVI в. Те, кто сомневаются в реальности законов природы, могли бы полагать, что поскольку в других частях мира сохранялись свои языки и религии, то там должны были сохраняться и свои научные традиции, которые в конце концов привели бы к установлению физических законов, полностью отличающихся от европейских. Конечно, ничего подобного не произошло: физика современной Японии и Индии ничем не отличается от физики Европы и Америки. Я признаю, что этот аргумент недостаточно убедителен, так как весь мир находился под глубоким влиянием других проявлений западной цивилизации, от военной организации до синих джинсов. И все же участие в дискуссии по квантовой теории поля или по слабым взаимодействиям в какой-нибудь аудитории в Цукубе или Бомбее придает мне глубокую уверенность, что законы физики существуют сами по себе.

Наше открытие связанной сходящейся структуры научных объяснений приводит к глубоким последствиям, и не только для ученых. Наряду с главным потоком научного познания существуют изолированные маленькие заводи, в которых плещется то, что я (выбирая самый нейтральный термин) назвал бы паранаука: астрология, гадание, передача мыслей, ясновидение, телекинез, креационизм и множество их разновидностей. Если бы удалось показать, что хоть в одном из этих понятий есть какая-то истина, это было бы открытием века, значительно более важным и заметным, чем все то, что происходит сегодня в нормальной физике. Что, спрашивается, должен думать мыслящий гражданин, услышав от какого-нибудь профессора, от кинозвезды или прочтя в газете, что есть свидетельства справедливости одной из этих паранаук?

Общепринятый ответ таков: это свидетельство должно быть проверено непредвзято и без теоретических предубеждений. Хотя подобная точка зрения широко распространена, я не думаю, что в ней много смысла. Однажды в телеинтервью³⁴ я сказал, что верить

в астрологию означает повернуться спиной ко всей современной науке. Через какое-то время я получил вежливое письмо от бывшего химика и металлурга из Нью Джерси, в котором он отчитал меня за то, что я лично не изучал свидетельства в пользу астрологии. Аналогично, когда Филипп Андерсон недоброжелательно отозвался³⁵ недавно о вере в телекинез и ясновидение, его упрекнул коллега из Принстона, Роберт Ян, экспериментирующий с тем, что сам он называет «связанными с сознанием аномальными явлениями»³⁶. Ян пожаловался, что «хотя его (Андерсона) кабинет находится всего в нескольких сотнях метров от моего, он не посетил нашу лабораторию, не обсудил непосредственно со мной ни одно из своих сомнений, и, по-видимому, даже не прочел внимательно ни одной специальной книжки»³⁷.

И Ян, и химик из Нью Джерси, и все, кто с ними согласны, не учитывают того, что называется ощущением взаимосвязанности научного знания. Конечно, мы не понимаем всего, но все же понимаем достаточно, чтобы утверждать, что в нашем мире нет места телекинезу или астрологии. Каким, спрашивается, должен быть физический сигнал, исходящий из нашего мозга, чтобы он мог двигать удаленные предметы, не оказывая при этом никакого влияния ни на какие научные приборы? Защитники астрологии иногда указывают на несомненное влияние Луны и Солнца на высоту приливов, однако действие гравитационных полей других планет слишком мало, чтобы ощутимо повлиять на земные океаны, а уж тем более на такое маленькое тело, как человек³⁸. (Я не стану развивать эту мысль, но аналогичные соображения применимы к любой попытке объяснить ясновидение, гадание или другие паранауки с помощью стандартной науки.) Во всяком случае корреляции, предсказываемые астрологами, совсем не те, которые могли бы возникнуть как результат действия очень слабых гравитационных полей; астрологи ведь не просто заявляют, что определенное расположение планет влияет на жизнь здесь, на Земле, они утверждают, что это влияние меняется для каждого человека в зависимости от дня и часа его рождения! На самом деле я не думаю, что большинство верящих в астрологию людей считают, будто ее предсказания выполняются из-за гравитации или любой другой причины, находящей объяснение в рамках физики; полагаю, они верят, что астрология — автономная наука, со своими фундаментальными законами, не выводимыми из законов физики или чего-нибудь еще. Одно из величайших достижений, связанных с открытием структуры научного объяснения, это демонстрация того, что не существует никаких автономных наук.

Но все же разве мы не должны проверить выводы астрологии, телекинеза и тому подобных вещей, чтобы быть уверенными, что там ничего нет? Я ничего не имею против любого человека, проверяющего все, что он хочет, но хочу объяснить, почему я сам не собираюсь этого делать и не рекомендую это занятие другим. В каждый момент времени перед нами имеется богатый выбор новых

идей, которые можно развивать: речь идет не только об астрологии и тому подобном, но и о многих идеях, находящихся значительно ближе к основному руслу научного потока, а также тех, которые прямо попадают в рамки современных научных исследований. Было бы неправильно утверждать, что *все* эти идеи должны быть тщательно проверены, на это просто не хватило бы времени. Каждую неделю я получаю по почте около пятидесяти препринтов статей по физике элементарных частиц и астрофизике, помимо нескольких статей и писем по всем видам паранаук. Даже если я заброшу все остальное в моей жизни, я не смогу внимательно разобраться во всех этих идеях. Так что же я должен делать? С подобными проблемами сталкиваются не только ученые, но каждый из нас. У нас просто нет другой альтернативы, кроме как решить, взвесив все как можно лучше, что некоторые из этих идей (возможно, большинство) не заслуживают внимания. Величайшим подспорьем при вынесении этого суждения является наше понимание структуры научного объяснения.

Когда испанские завоеватели в Мексике начали в XVI в. поход на север в страну, называвшуюся Техас, их толкали вперед слухи о городах из золота, семи городах Сиболы. В те времена это не казалось невероятным. В Техасе побывало несколько европейцев и, по рассказам каждого из них, там было полно чудес. Но предположим, что в наши дни кто-нибудь заявит, что в современном Техасе находятся семь золотых городов. Стали бы вы непредвзято рекомендовать снарядить экспедицию, чтобы обыскать каждый уголок штата между Красной рекой и Рио Гранде в поисках этих городов? Я думаю, вы все же решили бы, что мы уже достаточно знаем о Техасе, что большая часть его территории используется и заселена, так что просто бессмысленно пытаться искать сказочные золотые города. Точно так же открытие связной сходящейся структуры научных объяснений сослужило большую службу, научив нас, что в природе нет места астрологии, телекинезу, креационизму и другим предрассудкам.

ГЛАВА III. Похвала редукционизму

Дорогая, ты и я знаем, почему Летом небо голубое И птички в ветвях Поют свои песни.

Мередит Вильсон. Ты и я

Если вы начнете спрашивать всех окружающих, почему вещи такие, а не иные, и получите в ответ объяснение, основанное на каких-то научных принципах, а затем станете снова спрашивать, почему эти принципы верны, и наконец, как плохо воспитанный ребенок, будете после любого ответа спрашивать: «Почему? Почему? Почему?», то рано или поздно кто-нибудь обзовет вас редукционистом. Под этим словом разные люди понимают разные вещи, но думаю, что в любых рассуждениях о редукционизме есть нечто общее, а именно идея иерархии, когда некоторые истины считаются менее фундаментальными, чем другие, и первые могут быть сведены ко вторым, например химия — к физике. Редукционизм давно превратился в стандартное пугало в научной политике. Так, Научный совет Канады атаковал недавно Координационный комитет по сельскому хозяйству этой страны за то, что в нем засели редукционисты³⁹. (По-видимому, Научный совет имел в виду то, что комитет уделяет слишком много внимания химии и биологии растений.) Физики, занимающиеся элементарными частицами, особенно часто подвергаются обвинениям в редукционизме, так что частой причиной их испорченных отношений с другими учеными является неприятие последними этой идеи.

Взгляды оппонентов редукционизма образуют широкий идеологический спектр. На его наиболее разумном крае находятся те, кто отрицает самые наивные формы редукционизма. Я отношусь к таким взглядам с уважением. Сам я считаю себя редукционистом, но все же не думаю, что единственными интересными и глубокими проблемами в науке или даже в физике являются проблемы физики элементарных частиц. Я совершенно не думаю, что химики должны бросить все, что они делают, и вместо этого заняться решением уравнений квантовой

45

механики для разных молекул. Я также не считаю, что биологи должны перестать размышлять о растениях и животных как целостных организмах и думать только о клетках и ДНК. С моей точки зрения, редукционизм это не руководство для программы исследований, а способ отношения к самой природе. Я имею в виду лишь то ощущение, что наши научные принципы являются следствиями более глубоких научных принципов⁴⁰ (и, возможно, исторических случайностей) и что все эти принципы можно свести к простому набору связанных между собой законов. На данном этапе истории науки ученые полагают, что наилучший способ приблизиться к этим законам заключается в изучении физики элементарных частиц, хотя это и случайный аспект редукционизма, который может измениться со временем.

На другом краю спектра находятся те оппоненты редукционизма, которых приводят в ужас унылые перспективы развития современной науки. Чем в большей степени они и мир, в котором они живут, могут быть сведены к частицам, полям и их взаимодействиям, тем больше они чувствуют себя униженными этим знанием. Герой повести Достоевского «Записки из подполья» представляет себе ученого, говорящего ему: «...природа нас не спрашивается; нужно принимать ее так, как она есть, а не так, как мы фантазируем, и если мы действительно стремимся к табличке и к календарю, ну, и ... ну хоть бы даже и к реторте, то что же делать, надо принять и реторту!» и отвечает: «Эх, господа, какая уж тут своя воля будет, когда дело доходит до таблички и до арифметики, когда будет одно только дважды два четыре в ходу? Дважды два и без моей воли четыре будет. Такая ли своя воля бывает!»⁴¹ Уж совсем экстремистами являются те, кто помешался на холизме¹⁾, так что их реакция на редукционизм принимает форму веры в психическую энергию, жизненные силы и т. п. явления, не имеющие объяснения с помощью обычных законов неодушевленной природы. Я не буду даже пытаться отвечать этим критикам с помощью занудных разговоров о красотах современной науки. Редукционистское мировоззрение *обязательно предусматривает* холодный рассудок и беспристрастность. Это мировоззрение надо принимать таким, каким оно есть, и не потому, что оно нам нравится, а потому, что так устроен мир.

В средней части спектра антиредукционистов находится группа более влиятельных и менее бескорыстных людей. Это те ученые, которые приходят в ярость, когда слышат, что их разделы науки основываются на более глубоких законах физики элементарных частиц.

В течение ряда лет я ожесточенно спорил по поводу редукционизма со своим хорошим другом, биологом-эволюционистом Эрнстом Майром. Среди прочих заслуг этого ученого — лучшее из имеющихся определений понятия биологических видов. Споры начались, когда

¹⁾ Под холизмом (от англ. *whole* — целый) понимается изучение сложных структур в их целостности без сведения к изучению отдельных сторон явления. — *Прим. перев.*

48

объяснение открытия ДНК повлечет обвинение некоторых биологов в таком же дурном редукционизме, каким представляются Андерсону притязания физиков, занимающихся частицами. Например, Гарри Рубин писал несколько лет тому назад, что «революция, вызванная открытием ДНК, привела к тому, что целое поколение биологов поверило, будто секрет жизни полностью сокрыт в структуре и функциях ДНК»⁴⁸. Эта вера сейчас поколеблена и редукционистская программа должна быть дополнена новыми концепциями. Мой друг Эрнст Майр в течение многих лет борется против редукционистского направления в биологии, которое, как он опасается, пытается свести все, что мы знаем о жизни, к изучению ДНК, и добавляет, что «хотя благодаря открытию ДНК, РНК и т. п. была раскрыта химическая природа ряда черных ящиков классической генетики, все же это ни в коей мере не раскрыло суть передачи наследственности»⁴⁹.

Я не собираюсь вступать в эту полемику среди биологов, по крайней мере на стороне антиредукционистов. Нет сомнений, что открытие ДНК оказалось необычайно важным для многих областей биологии. И все же *есть* некоторые биологи, работу которых непосредственно не затронули открытия в молекулярной биологии. Знание структуры ДНК приносит мало пользы специалисту в области популяционной экологии, пытающемуся объяснить разнообразие видов растений в тропических дождевых лесах, или биомеханику, пытающемуся понять полет бабочек. Я полагаю, что даже если ни один биолог не получил бы никакой пользы от открытий в молекулярной биологии, все же существует один важный аспект этих открытий, который и дает право Андерсону говорить о секрете жизни. Дело не в том, что *открытие* ДНК было

фундаментальным для всех *наук* о жизни, а в том, что ДНК сама есть основа всей жизни. Живые существа таковы, каковы они есть, потому что они прошли долгий путь эволюции к теперешнему виду, а эта эволюция оказалась возможной благодаря свойствам ДНК и связанных с ней молекул, позволяющим организму передавать свой генетический код потомству. Точно так же, независимо от того, полезны или нет *открытия* в физике элементарных частиц всем другим ученым, *принципы* физики элементарных частиц являются фундаментом всей природы.

Оппоненты редукционизма часто ссылаются на то, что открытия в физике элементарных частиц вряд ли могут пригодиться ученым из других областей. Это не согласуется с историческими свидетельствами. Физика элементарных частиц в первой половине XX в. была главным образом физикой электронов и фотонов, и она оказала огромное и бесспорное влияние на наше понимание всех форм материи. Открытия в современной физике элементарных частиц уже значительно влияют на космологию и астрономию. Так, мы используем наши знания о количестве сортов элементарных частиц для расчетов образования химических элементов в первые несколько ми-

49

нут существования Вселенной. Никто не может сказать, какие еще последствия могут иметь эти открытия.

Но предположим на мгновение, что в дальнейшем *никакие* открытия в физике элементарных частиц не будут оказывать никакого влияния на работу ученых в других областях. Все равно работа физиков в области элементарных частиц будет иметь особое значение. Мы знаем, что эволюция живых существ оказалась возможной благодаря свойствам ДНК и других молекул, а свойства любой молекулы определяются свойствами электронов, атомных ядер и электрическими силами, действующими между ними. А почему эти объекты такие, как они есть? Частично это объяснила стандартная модель элементарных частиц, а теперь мы хотим совершить следующий шаг и объяснить стандартную модель и принципы теории относительности и других симметрий, на которых эта модель основана. Я не понимаю, как может все это казаться неважным всякому, кто интересуется тем, как устроен мир, совершенно независимо от любой возможной пользы, которую физика элементарных частиц может принести любому другому ученому.

Вообще говоря, элементарные частицы сами по себе не очень интересны, их даже сравнивать нельзя в этом смысле с людьми. Если не считать импульса и спина, каждый электрон во Вселенной похож на любой другой электрон — если бы вы увидели один электрон, считайте, что вы видели все. Но именно из этой простоты вытекает, что электроны, в противоположность людям, не состоят из множества более фундаментальных составляющих, а сами представляют собой нечто, близкое к фундаментальной составляющей всего остального. Элементарные частицы интересны именно потому, что они так однообразны; благодаря простоте их изучение приближает нас к исчерпывающему пониманию природы.

Пример с высокотемпературной сверхпроводимостью помогает уяснить тот специфический и ограниченный смысл, вкладываемый в слова, что физика элементарных частиц более фундаментальна, чем любые другие области физики. Именно в наши дни Андерсон и другие специалисты в области физики твердого тела пытаются понять загадочное возникновение сверхпроводимости в ряде соединений меди, кислорода и более экзотических элементов при температурах, много больших тех, которые считались возможными. В то же время физики, занимающиеся элементарными частицами, пытаются понять происхождение масс кварков, электронов и других частиц, входящих в стандартную модель. (Обе задачи, оказывается, связаны математически; как мы увидим ниже, обе они сводятся к вопросу, каким образом определенные симметрии, которыми обладали исходные уравнения, теряются в решениях этих уравнений.) Нет сомнений, что специалисты по твердому телу рано или поздно решат проблему высокотемпературной сверхпроводимости без всякой

50

прямой помощи со стороны физиков, занимающихся частицами⁵⁰, а когда последние поймут происхождение массы, это скорее всего произойдет без непосредственного участия физиков, занимающихся твердым телом. Разница между этими двумя задачами заключается в том, что когда твердотельщики наконец объяснят явление высокотемпературной сверхпроводимости, то какими бы ослепительными ни были новые идеи, которые будут при этом использованы, все равно в конце концов объяснение примет форму математической выкладки, в которой существование этого явления будет выведено из *известных* свойств электронов, протонов и атомных ядер. В противоположность этому, когда ученые, занимающиеся физикой частиц, поймут наконец происхождение массы в стандартной модели, объяснение будет основано на тех свойствах стандартной модели, которые нам сегодня совершенно неведомы и которые мы не можем узнать (хотя и можем догадываться) без новых экспериментальных данных, полученных на установках типа ССК. Поэтому физика элементарных частиц представляет собой границу нашего знания в том смысле, который отсутствует в физике твердого тела.

Само по себе это не решает проблемы распределения денег на исследования. Имеется множество побудительных мотивов научных исследований — применения в медицине и технологии, национальный престиж, любовь к математическим упражнениям, неподдельная радость от того, что стало понятным красивое явление, — которые могут быть удовлетворены при занятиях другими науками точно так же, как и физикой частиц (а иногда и лучше). Физики, занимающиеся элементарными частицами, не считают, что уникальный фундаментальный характер их работы дает им право первыми залезать в общественный кошелёк, но они полагают также, что нельзя просто игнорировать это обстоятельство, принимая решения о поддержке научных исследований.

Возможно, наиболее известная попытка установить стандарты для принятия подобных решений принадлежит Альвину Вайнбергу³⁾. Еще в статье 1964 г. он предложил такую схему: «Я хотел бы сформулировать критерий научной ценности, предложив, что, при прочих равных условиях, *те исследования имеют наибольшую научную ценность, которые наибольшим образом изменяют и делают более*

³⁾ Мы с Альвином Вайнбергом друзья, но не родственники. В 1966 г., когда я впервые посетил Гарвард, я оказался во время обеда в факультетском клубе за одним столом с покойным Джоном Ван Флеком, несколько резковатым аристократического вида физиком. Он был одним из тех, кто в конце 1920-х гг. впервые применил новые методы квантовой механики к теории твердого тела. Ван Флек спросил меня, не являюсь ли я родственником *того* Вайнберга. Я был несколько ошарашен, но потом понял, что он имел в виду: в те годы я был довольно молодым теоретиком, а Альвин был директором Окриджской Национальной лаборатории. Я собрал все мои запасы сарказма и ответил, что я *сам по себе* Вайнберг. Мне показалось, что это не произвело на Ван Флека сильного впечатления.

*ясными соседние научные дисциплины»*⁵¹ (выделено им). Прочитав мою статью на ту же тему⁵², Альвин написал мне и напомнил о своем предложении. Я его и не забывал, но с ним не согласен. В ответе Альвину я написал, что рассуждения такого рода могут быть использованы для оправдания траты миллиардов долларов на классификацию бабочек Техаса, так как это могло бы прояснить классификацию бабочек, встречающихся в Оклахоме, а также бабочек вообще. Этот глупый пример призван только показать, что ничего не стоит в обоснование неинтересного научного проекта сказать, что он важен для других неинтересных научных проектов. (Похоже, что после этих слов у меня будут проблемы с лепидоптеристами, которые хотели бы истратить миллиарды долларов на классификацию всех бабочек Техаса.) Но вот чего я действительно не вижу в критерии Альвина Вайнберга, так это *редукционистской* перспективы, а именно того, что одной из главных причин, делающих столь интересной научную работу, является надежда приблизиться к точке сближения всех наших объяснений.

Некоторые моменты в спорах, ведущихся физиками о редукционизме, удачно использовал Джеймс Глейк (именно он в своих публикациях объяснил широкой публике физику хаоса)⁵³. В недавнем выступлении он доказывал:

«Хаос несовместим с редукционизмом. Эта новая наука предъявляет жесткие требования устройству мира, а именно когда дело доходит до самых интересных вопросов: о порядке и беспорядке, распаде и созидании, образовании структуры и самой жизни, во всех этих случаях целое не может быть объяснено через свои составные части.

Существуют фундаментальные законы, управляющие поведением сложных систем, но они не похожи на обычные. Это законы структуры, организации и масштаба, и они просто исчезают, когда мы фокусируем внимание на отдельных составляющих сложной системы, точно так же, как теряет смысл разговор о психологии толпы куклуксклановцев, если вы берете интервью у отдельного ее участника»⁵⁴.

Я возразил бы на это, во-первых, что разные вопросы интересны по-разному. Несомненно, проблемы творчества и возникновения жизни интересны, так как мы живы и хотели бы творить. Но есть и другие вопросы, интересные потому, что они подводят нас все ближе к точке сближения наших объяснений. А открытие истоков Нила — оно ведь ничего не дало для лучшего понимания проблем сельского хозяйства в Египте, но кто скажет, что это открытие было неинтересно?

Во-вторых, здесь упускается из виду, что суть подобных вопросов состоит в объяснении целого «через свои составные части»; однако изучение кварков и электронов фундаментально не потому, что все обычное вещество из них состоит, а потому, что мы думаем, что их изучение позволит нам узнать что-то о *принципах*, на которых все

построено. (Именно эксперимент, в котором электронами обстреливали кварки внутри атомных ядер, решил дело в пользу современной единой теории двух из четырех фундаментальных сил в природе — слабых и электромагнитных сил.) На самом деле физик, занимающийся в наши дни частицами, уделяет больше внимания не содержащимся там кваркам и электронам, а экзотическим частицам, *не* входящим в обычное вещество, потому что нам кажется, что изучая именно эти частицы, мы быстрее получим ответы на интересующие нас вопросы. Когда Эйнштейн в своей общей теории относительности объяснил природу тяготения, это произошло не «через составные части», а через геометрию пространства-времени. Может так случиться, что физики двадцать первого века обнаружат, что изучение черных дыр или гравитационного излучения дает больше для понимания законов природы, чем физика элементарных частиц. Наша нынешняя сосредоточенность на элементарных частицах основана на тактическом соображении, что в *данный* момент истории науки именно этот путь ведет нас к окончательной теории.

Наконец, нужно еще установить, действительно ли существуют новые законы, управляющие сложными системами? Да, конечно, это так в том смысле, что разные уровни восприятия требуют разного языка для описания и анализа. Это в равной степени относится и к химии, и к хаосу. Но *фундаментальны* ли новые законы? Контрпримером является упомянутая Глейком толпа линчевателей. Можно попытаться сформулировать все, что мы знаем о толпах, в форме законов (таких, например, как старое изречение, что революции всегда пожирают своих детей), но если мы попросим объяснить, почему эти законы действуют, нас вряд ли удовлетворит ответ, что это — фундаментальные законы, не имеющие объяснений через что-то другое. Мы скорее будем искать редукционистское объяснение, основанное на психологии отдельных людей. Это же верно и в отношении установления хаоса. Поразительный прогресс, достигнутый в последние годы в этой области, заключался не только в наблюдении хаотических систем и формулировке эмпирических законов, управляющих ими; что значительно важнее, законы, которым подчиняется хаотическое поведение, были математически выведены из законов микрофизики, управляющих теми системами, в которых возникает хаос.

Я подозреваю, что все работающие ученые (и, возможно, вообще большинство людей) являются на практике такими же редукционистами, как я, хотя некоторые из них, вроде Эрнста Майра или Филиппа Андерсона, не любят употреблять этот термин. Например, медицинские исследования имеют дело с проблемами столь неотложными и трудными, что часто предложения новых методов лечения вынуждены опираться только на медицинскую статистику а не на понимание того, почему этот метод приносит плоды. Но даже если новая методика предложена на основании проверки на многих пациентах,

к ней, скорее всего, будут относиться со скептицизмом до тех пор, пока не удастся понять, как можно объяснить новый метод на основе редукционизма с помощью таких наук, как биохимия или биология клетки. Представьте, что медицинский журнал поместил две статьи, описывающие два новых способа лечения золотухи: с помощью приема внутрь куриного бульона и с помощью прикосновения короля. Даже если статистические данные, представленные в каждой из статей, одинаково убедительны, я полагаю, что медики (да и кто угодно) по-разному прореагируют на эти статьи. В том, что касается куриного бульона, думаю, что большинство людей отнесется к этому методу непредвзято, сохранив право на окончательное суждение до тех пор, пока он не будет независимо проверен. В конце концов, куриный бульон — это смесь очень полезных веществ, и кто знает, какой эффект могут оказывать его составные части на микобактерию, вызывающую золотуху? С другой стороны, какие бы статистические данные ни приводились, чтобы доказать, что прикосновение руки короля помогает излечить золотуху, читатели статьи остались бы в глубоком сомнении, подозревая обман или случайное совпадение, так как они не смогли бы представить себе, как можно было бы хоть когда-нибудь редуктивно объяснить такой метод лечения. Какое дело микобактерии, был ли человек, прикасающийся к больному, должным образом коронован и помазан на царство, или это просто старший сын предыдущего монарха? (Даже в средние века, когда все считали, что

прикосновение короля излечивает золотуху, сами короли, похоже, сильно в этом сомневались. Насколько я знаю, во всех средневековых битвах между соперничавшими династиями, например между Плантагенетами и Валуа или Йорками и Ланкастерами, ни один из претендентов на трон ни разу не пытался доказать, что он истинный король, путем демонстрации излечивающей силы своего прикосновения.) Те нынешние биологи, которые попытались бы утверждать, что подобное лечение не требует объяснения, так как сила королевского прикосновения является автономным законом природы, не встретили бы понимания со стороны коллег с редукционистским мировоззрением, так как в его рамках таким автономным законам нет места.

То же самое верно и в отношении всех наук. Мы не должны серьезно относиться к предлагаемым автономным законам макроэкономики, которые не могут быть в принципе объяснены поведением отдельных личностей, или к гипотезам о происхождении сверхпроводимости, которые не могут быть в принципе объяснены свойствами электронов, фотонов и ядер. Редукционистская позиция является хорошим фильтром, позволяющим ученым во всех областях знания не тратить время на обсуждение малообещающих идей. В этом смысле мы все сейчас редукционисты.

ГЛАВА IV. Квантовая механика и ее критики

Играющий ставил шар на стол и ударял по шару кием. Следя за катящимся шаром, мистер Томпкинс к своему большому удивлению заметил, что шар начал «расплываться». Это было единственное выражение, которое пришло ему на ум при виде странного поведения бильярдного шара, который, катясь по зеленому полю, казался все более и более размытым, на глазах утрачивая четкость своих контуров. Казалось, что по зеленому сукну катится не один шар, а множество шаров, к тому же частично проникающих друг в друга. Мистеру Томпкинсу часто случалось наблюдать подобные явления и прежде, но сегодня он не принял ни капли виски и не мог понять, почему так происходит.

Георгий Гамов. Мистер Томпкинс исследует атом¹⁾

Открытие квантовой механики в середине 1920-х гг. было самой глубокой революцией в физической теории с момента зарождения современной физики в XVII в. Когда мы рассматривали выше свойства кусочка мела, наша цепочка вопросов снова и снова приводила к ответам, сформулированным на языке квантовой механики. Все затейливые математические теории, которыми в последние годы занимаются физики, — квантовые теории поля, калибровочные теории, теории суперструн — все они формулируются в рамках квантовой механики. Если и есть что-то в нашем сегодняшнем понимании природы, что имеет шанс выжить в окончательной теории, так это квантовая механика.

Историческая важность квантовой механики состоит не только в том, что она дала ответы на многие старые вопросы об устройстве

¹⁾ Гамов Г. Мистер Томпкинс исследует атом. М.: УРСС, 2003. — Прим. ред.

55

материи; значительно важнее, что она изменила наши представления о тех вопросах, которые нам разрешено задавать. С точки зрения последователей ньютоновской физики, теории предназначены для того, чтобы обеспечивать математический аппарат, позволяющий физикам вычислять положения и скорости частиц в любой системе во все будущие моменты времени, если полностью известны (что никогда не реализуется на практике) значения этих величин в любой данный момент времени. Однако квантовая механика принесла с собой совершенно иной способ описания состояния системы. В ней мы используем математические конструкции, называемые волновыми функциями, которые дают информацию только о вероятностях возможных значений положений и скоростей частиц в системе. Это изменение взгляда столь глубоко, что физики сейчас используют слово «классический» не по отношению к древним грекам и римлянам или к Моцарту и т. д., а по отношению к периоду «до квантовой механики».

Если попытаться назвать момент, когда родилась квантовая механика, то, наверное, им должен стать тот отпуск, который устроил себе молодой Вернер Гейзенберг в 1925 г. Страдая от сенной лихорадки, Гейзенберг сбежал от цветущих лугов вблизи Гёттингена на пустынный остров Гельголанд в Северном море. До этого Гейзенберг и его коллеги в течение нескольких лет пытались разрешить проблему, возникшую в 1913 г. в построенной Нильсом Бором теории атома: почему электроны в атоме занимают только некоторые разрешенные орбиты с определенными энергиями? На Гельголанде Гейзенберг начал обдумывать все сначала. Он решил, что поскольку никто не может непосредственно наблюдать орбиту электрона в атоме, он будет пытаться иметь дело только с величинами, которые можно измерить, а именно с энергиями квантовых *состояний*, в которых все электроны атома занимают разрешенные орбиты, и со скоростями спонтанного перехода атома из одного такого состояния в любое другое состояние с испусканием при этом частицы света (фотона). Из этих скоростей перехода Гейзенберг составил то, что он назвал «таблицей», затем ввел математические операции с этой таблицей, приводившие к появлению новых таблиц, причем каждой физической величине, например положению электрона, его скорости или квадрату скорости, соответствовала своя таблица²⁾. Зная зависимость энергии частицы в простой системе от скорости и положения, Гейзенберг сумел вы-

²⁾ Более точно, элементами гейзенберговской таблицы были, как их называют, амплитуды переходов, квадраты которых определяют скорости переходов. После того как Гейзенберг вернулся с Гельгоlanda в Геттинген, ему объяснили, что математические операции над такими таблицами давно хорошо известны математикам; подобные таблицы математики называют матрицами, а операции, в результате которых можно перейти от таблицы, представляющей скорость электрона, к таблице, представляющей квадрат скорости, известны как матричное умножение. Это один из примеров загадочной способности математиков предвидеть те структуры, которые имеют отношение к реальному миру.

56

числить таблицу энергий системы в разных квантовых состояниях, в определенном смысле пародируя тот способ, которым ньютоновская физика вычисляет энергию планеты по известным значениям ее скорости и положения.

Если то, что сделал Гейзенберг, озадачивает читателя, то вы, читатель, не одиноки. Несколько раз я пытался прочесть статью, написанную Гейзенбергом по возвращении с Гельгоlanda и, хотя, как мне кажется, я понимаю квантовую механику, мне никогда не удавалось понять те мотивы, которые побудили Гейзенберга к математическим действиям в его работе. Физики-теоретики в своих самых удачных работах стремятся сыграть одну из двух ролей: они выступают либо как *мудрецы*, либо как *волшебники*. Физик-мудрец рассуждает в определенном порядке о физических проблемах, основываясь на фундаментальных идеях о том, как устроена природа. Например, Эйнштейн, развивая общую теорию относительности, играл роль мудреца; перед ним стояла четко очерченная проблема — как совместить теорию тяготения с новым взглядом на пространство и время, предложенным им в 1905 г. в специальной теории относительности. В руках у него было несколько ценных ключей к разгадке, в частности важный факт, открытый Галилеем, что движение небольших тел в гравитационном поле не зависит от природы этих тел. Это позволило Эйнштейну предположить, что тяготение может быть свойством самого пространства-времени. Кроме того, Эйнштейну была известна хорошо развитая математическая теория искривленных пространств, разработанная еще в XIX в. Риманом и другими математиками. В наше время вполне можно преподавать общую теорию относительности, следуя практически тем же аргументам, которые использовал Эйнштейн в своей заключительной работе 1915 г. Но есть и физики-волшебники, которые, кажется, совершенно не размышляют, а перескакивая через все промежуточные ступени, сразу приходят к новому взгляду на природу. Авторы учебников по физике

обычно пытаются переложить работы волшебников на другой язык, так что они становятся похожи на работы мудрецов, иначе ни один читатель не смог бы понять физику. Планк выступил как волшебник, предложив в 1900 г. свою теорию тепловое излучения, да и Эйнштейн отчасти был им, когда в 1905 г. ввел понятие фотонов. (Возможно, именно поэтому он позднее расценивал теорию фотонов как самое революционное из своих достижений.) Обычно не очень трудно понять работы физиков-мудрецов, но работы физиков-волшебников часто совершенно невразумительны. В этом смысле статья Гейзенберга 1925 г. была чистой магией.

Может быть, и не следует так внимательно читать первую статью Гейзенберга. Он общался со множеством одаренных физиков-теоретиков, включая Макса Борна и Паскуаля Йордана в Германии и Поля Дирака в Англии, так что к концу 1925 г. эти ученые превратили идеи Гейзенберга в понятную и систематическую версию квантовой

57

механики, называемую в наше время матричной механикой. В январе следующего года в Гамбурге школьный приятель Гейзенберга Вольфганг Паули сумел применить новую матричную механику к решению основополагающей задачи атомной физики — расчету энергий квантовых состояний атома водорода, подтвердив тем самым результаты, полученные ранее Бором на основе полуклассических постулатов.

Проведенный Паули квантовомеханический расчет уровней энергии водорода был блистательной демонстрацией математического искусства, мудрым использованием найденных Гейзенбергом правил и особых симметрий атома водорода. Хотя Гейзенберг и Дирак, может быть, были более плодотворными, чем Паули, ни один из живших тогда физиков не был более умным. Но даже Паули не сумел применить свои вычислительные приемы к следующему по сложности атому гелия, не говоря уже о более тяжелых атомах или молекулах.

На самом деле та квантовая механика, которую в наши дни изучают на младших курсах и используют в повседневной работе химии и физики, это не матричная механика Гейзенберга, Паули и их сотрудников, а математически эквивалентный (хотя и значительно более удобный) формализм, предложенный несколько позже Эрвином Шрёдингером. В той версии квантовой механики, которую разработал Шрёдингер, каждое возможное физическое состояние системы описывается заданием величины, известной как *волновая функция* системы, что немного напоминает способ описания света как волны электрического и магнитного полей. Еще до работ Гейзенберга Луи де Бройль в статьях 1923 г. и докторской диссертации 1924 г. описал подход к квантовой механике, основанный на понятии волновой функции. Де Бройль предположил, что электрон можно рассматривать как определенного сорта волну, причем длина волны связана с импульсом электрона тем же соотношением Эйнштейна, которое определяет связь длины волны света с импульсом фотона; в обоих случаях длина волны равна фундаментальной постоянной природы, известной как постоянная Планка, деленной на импульс. Де Бройль совершенно не представлял себе физический смысл этой волны и не предложил никакого динамического волнового уравнения; он просто предположил, что разрешенные орбиты электронов в атоме водорода должны быть достаточно большими, чтобы вдоль них умещалось целое число полных длин волн — одна для наинизшего энергетического состояния, две для следующего и т. д. Примечательно, что эта простая и не слишком хорошо мотивированная гипотеза приводила к тем же успешным результатам для энергий электрона на разных орбитах в атоме водорода, что и проделанные десятью годами ранее вычисления Бора.

После такой диссертации можно было бы надеяться, что де Бройлю удастся решить все проблемы физики. На самом деле за всю

58

оставшуюся жизнь он не сделал практически ничего, что имело бы научное значение. Именно Шрёдингер в Цюрихе в 1923—1926 гг. преобразовал довольно расплывчатые идеи де Бройля об электронных волнах в точный и согласованный математический формализм, применимый к электронам или другим частицам в атомах и молекулах любого сорта. Шрёдингер сумел также показать, что его «волновая механика» эквивалентна матричной механике Гейзенберга; одна может быть математически выведена из другой.

В центре шредингеровского подхода было динамическое уравнение (с тех пор получившее название уравнения Шрёдингера), определявшее, как меняется со временем волна каждой из частиц. Некоторые из решений уравнения Шрёдингера для электронов в атомах имеют характер колебаний с определенной частотой, напоминая этим звуковую волну, рожденную идеальным камертоном. Такие частные решения соответствуют возможным стабильным квантовым состояниям атома или молекулы (нечто вроде стоячих волн в камертоне), причем энергия атомного состояния определяется частотой волны, умноженной на постоянную Планка. Именно эти энергии доступны нашему восприятию путем наблюдения цветов того света, который атом может испустить или поглотить.

С математической точки зрения уравнение Шрёдингера относится к тому же типу уравнений, которые использовались еще в XIX в. для изучения звуковых или световых волн. Физики 1920-х гг. уже ощущали себя настолько уверенно при действиях с подобными уравнениями, что смогли немедленно заняться вычислениями энергий и других свойств всех сортов атомов и молекул. Это было золотое время для физиков. Затем быстро последовали новые успехи, и стало казаться, что тайны, окружавшие атомы и молекулы, стали одна за одной испаряться.

Несмотря на эти успехи, ни де Бройль, ни Шрёдингер, ни кто-либо другой не понимали сначала, что за физическая величина совершает колебания в электронной волне. Волна любого типа описывается в каждый данный момент времени перечислением набора чисел, соответствующих каждой точке того пространства, в котором распространяется волна⁵⁵. Например, в звуковой волне эти числа определяют давление воздуха в каждой точке. В световой волне в каждой точке пространства, в котором распространяется волна, задаются значения и направления векторов напряженностей электрического и магнитного полей. Электронную волну также можно описать, задав в каждый момент времени набор чисел, соответствующих каждой точке пространства как внутри, так и вне атома⁵⁶. Этот набор чисел и является волновой функцией, а отдельные числа называются значениями волновой функции в данной точке. Все, что ученые могли поначалу сказать о волновой функции, это то, что

59

она есть решение уравнения Шрёдингера; никто не знал, какую же физическую величину описывают ее значения.

Теоретики, занимавшиеся в середине 1920-х гг. квантовой механикой, находились примерно в том же положении, что и

физики, изучавшие свет в начале XIX в. Наблюдение таких явлений, как дифракция (отклонение лучей света от прямолинейного распространения при прохождении вблизи каких-то тел или через очень маленькие отверстия) заставили Томаса Юнга и Огюстена Френеля предположить, что свет есть определенного типа волна, отклоняющаяся от прямолинейного распространения при прохождении через небольшие отверстия потому, что размеры отверстий оказываются меньше длины волны света. Но никто в начале XIX в. не знал, волной *чего* был свет; только после работ Джеймса Клерка Максвелла в 1860-е гг. стало ясно, что свет есть волна переменных электрического и магнитного полей. Какая же величина меняется в электронной волне?

Ответ был найден в результате теоретического изучения поведения свободных электронов, когда ими обстреливают атомы. Естественно описывать электрон, летящий в пустом пространстве, как волновой пакет, маленький сгусток распространяющихся вместе электронных волн, напоминающий вспышку света от карманного фонарика, если его на мгновение включить. Уравнение Шрёдингера показывает, что когда такой пакет ударяется об атом, он рассыпается⁵⁷; отдельные волны начинают разлетаться во всех направлениях, как брызги воды от струи из садового шланга, направленной на стенку. Это казалось загадочным; ведь электроны, ударяющиеся об атомы, разлетаются в том или ином направлении, но они не рассыпаются на части, они остаются электронами. В 1926 г. Макс Борн в Гёттингене предложил интерпретировать это странное поведение волновой функции с помощью вероятностных представлений. Электрон не рассыпается, но может рассеиваться в любом направлении, причем вероятность того, что электрон рассеивается в каком-то определенном направлении, становится максимальной там, где волновая функция принимает максимальные значения. Иными словами, электронные волны не являются волнами *чего-то*; их смысл просто в том, что значение волновой функции в каждой точке определяет вероятность того, что электрон находится в окрестности этой точки.

Ни Шрёдингер, ни де Бройль не были удовлетворены такой интерпретацией электронных волн. Возможно, это и объясняет, почему ни один из них не внес далее существенного вклада в развитие квантовой механики. Но вероятностная интерпретация электронных волн была поддержана в следующем году Гейзенбергом, высказавшим весьма примечательные соображения. Гейзенберг рассматривал те проблемы, с которыми сталкиваются физики при измерении положения и импульса электрона. Чтобы осуществить аккуратное измерение положения электрона, необходимо использовать свет короткой длины

60

волны, так как дифракция всегда размывает изображение любого предмета, размеры которого меньше длины волны света. Но свет короткой длины волны состоит из фотонов, обладающих, соответственно, большим импульсом. Поэтому, когда мы используем фотоны с большим импульсом для наблюдения электрона, он неизбежно получает большую отдачу в результате соударения, унося какую-то долю импульса фотона. Таким образом, чем точнее мы пытаемся измерить положение электрона, тем меньше мы знаем после такого измерения об импульсе электрона. Это правило получило название *соотношения неопределенностей Гейзенберга*³⁾. Электронная волна, имеющая в каком-то месте острый максимум, соответствует электрону с достаточно четко определенным положением, но импульс такого электрона может иметь почти любое значение. Наоборот, электронная волна, имеющая форму сглаженной, равноудаленной последовательности горбов и впадин на расстоянии многих длин волн, соответствует электрону с достаточно определенным значением импульса, но совершенно неопределенным положением⁵⁸. Наиболее типичные электроны, вроде тех, которые находятся в атомах или молекулах, не имеют ни определенного положения, ни определенного импульса.

Физики продолжали ожесточенно спорить об интерпретации квантовой механики в течение многих лет после того, как они научились решать уравнение Шрёдингера. Среди них выделялся Эйнштейн, отвергавший квантовую механику в своей работе; большинство физиков просто пыталось ее понять. Многие споры на эти темы проходили в Институте теоретической физики Копенгагенского университета под руководством Нильса Бора⁴⁾. Особое внимание Бор обращал на удивительное свойство квантовой механики, названное им *дополнительностью*⁵⁹: знание одного свойства или аспекта поведения системы исключает знание ряда других свойств. Соотношение неопределенностей Гейзенберга как раз являлось примером допол-

³⁾ Более точно, поскольку длина волны света равна постоянной Планка, деленной на импульс фотона, неопределенность в положении любой частицы не может быть меньше, чем постоянная Планка, деленная на неопределенность ее импульса. Мы не замечаем неопределенности в положении обычных тел вроде бильярдных шаров, так как постоянная Планка очень мала. В системе единиц, с которой лучше всего знакомо большинство физиков и основанной на сантиметрах, граммах и секундах как базовых единицах длины, массы и времени, планковская постоянная равна $6,626 \times 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Это значение так мало, что длина волны бильярдного шара, катящегося по столу, много меньше размера атомного ядра. Таким образом, не составляет труда одновременно очень точно измерить как положение шара, так и его импульс.

⁴⁾ Мне посчастливилось встречаться с Бором, правда уже в конце его научной деятельности и в самом начале моей. Бор принимал меня, когда я в первый раз приехал на годичную стажировку в его институт в Копенгагене. Однако мы беседовали очень мало, так что я не вынес из этих разговоров каких-то мудрых мыслей — Бор был знаменит своим бормотанием и всегда было довольно трудно догадаться, что он имеет в виду. Я помню выражение ужаса на лице моей жены, когда во время вечеринки, проходившей в зимнем саду его дома, Бор что-то долго ей говорил и она чувствовала, что не может понять ничего из того, что ей говорит великий человек.

61

нительности: знание положения частицы (или импульса) исключает знание ее импульса (или положения)⁵⁾.

В начале 1930-х гг. дискуссии в институте Бора привели к созданию ортодоксальной «копенгагенской» формулировки квантовой механики, использовавшей значительно более общие понятия, чем употребляемые в волновой механике отдельных электронов. Независимо от того, состоит ли система из одной или многих частиц, ее состояние в любой момент времени описывается набором чисел — значениями волновой функции, причем каждое число соответствует определенной возможной конфигурации системы. Одно и то же состояние можно описать, перечисляя значения волновой функции для конфигураций, заданных множеством разных способов, например, указанием положений всех частиц в системе, или

импульсов всех этих частиц, или многими другими способами. Однако невозможно описать систему, задав одновременно положения *и* импульсы всех частиц.

Суть копенгагенской интерпретации состоит в резком отделении самой системы от тех приборов, которые используются для измерения ее конфигурации. Как подчеркивал Макс Борн, в промежутках между измерениями значения волновой функции изменяются идеально непрерывным и детерминированным образом, определяемым некоторой обобщенной версией уравнения Шрёдингера. В это время нельзя говорить, что система находится в какой-то определенной конфигурации. Если же мы измеряем конфигурацию системы (т. е. измеряем положения *или* импульсы всех частиц, но не эти величины одновременно), система скачком переходит в состояние с той или иной конфигурацией, причем вероятности нахождения системы в этих конфигурациях определяются квадратами значений их волновых функций перед измерением⁶⁰.

Попытка рассказывать о квантовой механике одними словами неизбежно создает только самое смутное впечатление о том, что это за наука. Сама по себе квантовая механика совершенно прозрачна; хотя она поначалу и кажется непонятной, но предлагает точную процедуру вычисления энергий, скоростей перехода и вероятностей. Я хочу попытаться вместе с читателем еще немного углубиться в квантовую механику. Для этой цели я буду рассматривать систему простейшего возможного типа, имеющую всего лишь две возможные конфигурации. Можно представить такую систему как мифическую частицу!⁶¹!, обладающую не бесконечным числом возможных положений, а всего лишь двумя, скажем положениями *здесь* и *там*. Тогда состояние систе-

⁵⁾ В последующие годы Бор подчеркивал важность принципа дополнительности в областях, весьма далеких от физики. Рассказывают, что однажды Бора спросили на немецком языке, какое качество дополнительно к истине (*Wahrheit*). После некоторых раздумий Бор ответил: ясность (*Klarheit*). Я почувствовал глубину этого высказывания, когда писал эту главу.

62

мы в любой момент времени описывается двумя числами, значениями волновой функции, соответствующими *здесь* и *там*.

Описание нашей мифической частицы в рамках классической физики очень просто: она с определенностью находится либо *здесь*, либо *там*, хотя и может перепрыгивать из *здесь* в *там* или обратно в результате действия какого-то динамического закона. В квантовой механике дело обстоит сложнее. Когда мы не наблюдаем частицу, то состояние системы может быть чистым *здесь*, и в этом случае значение *там* волновой функции должно обратиться в нуль, или чистым *там*, и тогда значение *здесь* волновой функции должно обратиться в нуль. Однако возможно (и более типично), что ни одно из значений волновой функции в нуль не обращается и частица не находится с определенностью ни *здесь*, ни *там*. Если мы посмотрим, находится ли частица *здесь* или *там*, мы конечно найдем ее в одном из этих положений, но вероятность, что она окажется *здесь*, будет определяться квадратом значения *здесь* волновой функции перед измерением⁶², а вероятность обнаружения частицы *там* будет равняться квадрату значения *там* ее волновой функции. Согласно копенгагенской интерпретации, когда мы измеряем, находится ли частица в конфигурации *здесь* или *там*, значения волновой функции скачком меняются; либо значение *здесь* становится равным единице, а значение *там* — нулю, либо наоборот. Однако знание волновой функции не позволяет предсказать точно, что произойдет, а позволяет узнать только вероятности этих скачков.

Система всего лишь с двумя конфигурациями так проста, что вид уравнения Шрёдингера для нее можно представить, не используя символы. Между измерениями скорость изменения значения *здесь* волновой функции равна некоторому постоянному числу, умноженному на значение *здесь*, плюс некоторое другое постоянное число, умноженное на значение *там*; скорость изменения значения *там* равна третьей константе, умноженной на значение *здесь*, плюс четвертая константа, умноженная на значение *там*. Эти четыре постоянных числа совместно называются *гамильтонианом* такой простой системы. Гамильтониан характеризует не какое-то конкретное состояние системы, а саму систему; знание гамильтониана позволяет полностью определить, как изменяется состояние системы при любых начальных условиях. Сама квантовая механика не говорит нам, как выглядит гамильтониан; его конкретный вид должен определяться нашими экспериментальными и теоретическими знаниями о природе обсуждаемой системы⁶³.

Эта же простая система может быть использована для иллюстрации идеи Бора о дополнительности, если рассмотреть другие способы описания состояния той же частицы. Например, существует пара состояний, напоминающих состояния с определенным импульсом, которые можно условно назвать состояниями *стой* и *иди*⁶⁴,

63

и в которых значение волновой функции *здесь* либо равно значению *там*, либо равно этому значению, взятому со знаком минус. Мы можем, если хотим, задать волновую функцию ее значениями *стой* и *иди*, а не значениями *здесь* и *там*: значение *стой* есть сумма значений *здесь* и *там*, а значение *иди* — разность этих значений. Если нам достоверно известно, что частица находится в состоянии *здесь*, значение *там* волновой функции должно обратиться в нуль, так что значения *стой* и *иди* совпадают. Это означает, что мы ничего не можем сказать об импульсе частицы; обе возможности реализуются с вероятностью 50 %. Обратно, если мы достоверно знаем, что частица находится в состоянии *стой* с нулевым импульсом, тогда значение *иди* волновой функции обращается в нуль, и, поскольку это значение равно разности значений *здесь* и *там*, они должны совпадать друг с другом. Отсюда следует, что мы ничего не можем сказать о том, находится ли частица *здесь* или *там*; вероятность каждого события равна 50%. Итак, существует полная дополнительность измерений состояний *здесь—там* и *стой—иди*: мы можем делать измерения любого типа, но как только выбор сделан, информация о результатах, которые получились бы при измерениях другого типа, полностью теряется.

Мнения всех о том, как следует применять квантовую механику, согласуются, но в вопросе о том, как следует понимать то, что мы делаем, когда применяем ее, существуют большие разногласия. Тех, кого раздражает редукционизм и детерминизм ньютоновской физики, должны порадовать два аспекта квантовой механики. Во-первых, в ньютоновской физике человеческие существа не имеют особого статуса, а в рамках копенгагенской интерпретации квантовой механики люди играют существенную роль, придавая смысл волновой функции путем акта измерения. Во-вторых, там, где физик-ньютоновец говорит о точных предсказаниях, физик, приверженный квантовой механике, предлагает только вычисления вероятностей, что опять, похоже, дает возможность вспомнить о свободной воле или Божественном провидении.

Некоторые ученые и писатели, например Фритьоф Капра⁶⁵, приветствуют те стороны квантовой механики, которые, как они считают, дают возможность примирить научное познание с более тонкими проблемами нашего существования. Я бы тоже радовался, если бы считал такую возможность реальной, но полагаю, что это не так. Квантовая механика невероятно важна для физики, но я не могу обнаружить в ней каких-то откровений, касающихся жизни человека, принципиально отличающихся от тех, которые нам известны в рамках ньютоновской физики.

Так как эти вопросы все еще вызывают споры, я пригласил для их обсуждения двоих хорошо известных личностей.

64

Диалог о смысле квантовой механики

*Крошка Тим*⁶ Я думаю, квантовая механика — замечательная наука. Мне никогда не нравилось, что в ньютоновской механике, зная положение и скорость каждой частицы в данный момент, вы можете полностью предсказать будущее поведение системы, так что при этом не остается места ни для свободной воли, ни вообще для особой роли людей. В квантовой механике все ваши предсказания расплывчаты и вероятностны, ничто не находится в определенном состоянии до тех пор, пока человеческие существа не совершат акт наблюдения. По-моему, что-то похожее говорили некоторые восточные мистики.

Дядюшка Скрудж. Э-э! Я, может быть, и поменял свое мнение насчет Рождества, но чепуху-то я всегда узнаю. Конечно, у электрона нет определенных значений положения и скорости в один и тот же момент времени, но это просто означает, что такие величины не подходят для описания электрона. В каждый момент времени и электрон, и любой коллектив частиц имеют волновую функцию. Если есть человек, наблюдающий частицы, то и состояние всей системы, включая человека, описывается волновой функцией. Эволюция волновой функции так же детерминирована, как и орбиты частиц в ньютоновской механике. На самом деле она еще более детерминирована, так как уравнения, определяющие то, как волновая функция меняется со временем, слишком просты, чтобы обладать хаотическими решениями⁶⁶. Так где же твоя свободная воля?

Крошка Тим. Меня поражает, что вы отвечаете столь ненаучным образом. Волновая функция не представляет объективной реальности, так как ее нельзя измерить. Например, если мы наблюдаем, что частица находится *здесь*, мы не в силах из этого заключить, что волновая функция *до* наблюдения имела нулевое значение *там*; у нее могли быть любые значения *здесь* и *там* и нам просто посчастливилось обнаружить частицу *здесь*, а не *там* в результате акта наблюдения. Но если волновая функция не реальна, то почему же вы придаете так много значения тому, что она эволюционирует детерминированным образом? Все, что мы когда-либо можем измерить, это величины типа положения, импульса или спина, и для них мы можем получить только вероятностные предсказания. При этом до тех пор, пока какой-нибудь человек не вмешивается с тем, чтобы измерить эти величины, мы вообще не можем сказать, что частица находится в каком-то определенном состоянии.

Дядюшка Скрудж. Мальчик мой, похоже, ты проглотил безо всякой критики родившуюся в девятнадцатом веке доктрину, называемую

⁶ См.: *Диккенс Ч. Рождественская песнь в прозе* / Пер. Т. Озерской // Диккенс Ч. Приключения Оливера Твиста. Повести и рассказы. М: Художественная литература, 1969 (Библиотека всемирной литературы. Серия вторая. Т. 82). — *Прим. перев.*

65

позитивизмом, которая утверждает, что наука должна иметь дело только с теми вещами, которые можно реально наблюдать. Согласен, что ни в одном эксперименте невозможно измерить волновую функцию. Ну и что? Много раз повторив измерения для одного и того же начального состояния, ты можешь узнать, какой должна быть волновая функция этого состояния и применять результаты для проверки наших теорий. Чего же еще требовать? Тебе, на самом деле, нужно привести свои мысли в соответствие с двадцатым веком. Волновые функции реальны настолько же, насколько реальны кварки и симметрии: их просто удобно включить в наши теории. Любая система находится в определенном состоянии, *независимо от того, наблюдает ее какое-либо человеческое существо или нет*; состояние описывается не своими положением или импульсом, а волновой функцией.

Крошка Тим. Не думаю, что мне стоит спорить о том, что реально, а что нет, с тем, кто проводит вечера, прогуливаясь с духами. Позвольте мне только напомнить вам серьезную проблему, с которой сталкиваешься немедленно, как только представляешь, что волновая функция реальна. Эта проблема была упомянута во время той атаки на квантовую механику, которую предпринял Эйнштейн на Сольвеевском конгрессе 1933 г. в Брюсселе, а затем в 1935 г. была изложена им письменно в знаменитой статье совместно с Борисом Подольским и Натаном Розеном. Представьте систему, состоящую из двух электронов и приготовленную таким образом, что в какой-то момент времени электроны находятся на известном большом расстоянии друг от друга и обладают известным суммарным импульсом. (Это не нарушает соотношение неопределенностей Гейзенберга. Например, можно с любой желаемой точностью измерить расстояние между электронами, послав от одного к другому пучок света очень короткой длины волны; это, конечно, исказит импульс каждого из электронов, но в силу закона сохранения импульса, не изменит их *полный* импульс.) Если затем кто-то измеряет импульс первого электрона, то импульс второго также можно немедленно найти, поскольку известна сумма импульсов. С другой стороны, если кто-то измеряет положение первого электрона, то и положение второго становится немедленно известным, так как измерено расстояние между ними. Но все это означает, что наблюдая состояние первого электрона, вы можете мгновенно изменить волновую функцию, так что второй электрон станет обладать определенным положением или определенным импульсом, *даже несмотря на то, что вы и близко не подходили ко второму электрону*. И что же, вы продолжаете настаивать на реальности волновой функции, которую можно менять таким способом?

Дядюшка Скрудж. Я готов все это принять. Точно так же, меня не беспокоит проблема с выполнением закона специальной теории относительности, запрещающего распространение сигналов со ско-

66

ростью, большей скорости света; нет никакого противоречия и с этим законом. У физика, который измеряет импульс

второго электрона, нет способов узнать, не исказилось ли значение, измеренное им, в результате наблюдения первого электрона. Все, что ему известно, что электрон перед измерением мог в том числе иметь и определенное положение, и определенный импульс. Даже Эйнштейн не смог бы воспользоваться измерениями подобного рода, чтобы послать мгновенный сигнал от одного электрона к другому. (Можно было бы заметить, что Джон Белл сравнительно недавно столкнулся с еще более фантастическими следствиями квантовой механики, касающимися атомных спинов, а физики-экспериментаторы показали⁶⁷, что спины в атомных системах ведут себя так, как предсказывает квантовая механика, т. е. на самом деле законы квантовой механики отражают устройство самого мира.) Мне кажется, что ничто из сказанного не может заставить нас отказаться от мыслей о волновых функциях как о реальности; просто волновая функция ведет себя непривычным для нас образом, допуская мгновенные изменения, влияющие на волновую функцию всей Вселенной. Я думаю, что тебе надо перестать выискивать в квантовой механике глубокие философские откровения и предоставить мне возможность пользоваться ею.

Крошка Тим. Прошу меня извинить, но я должен заметить, что если вы готовы признать мгновенные изменения волновой функции во всем пространстве, то, как я подозреваю, вы готовы признать что угодно. Кроме того, надеюсь, вы простите меня, если я скажу, что вы не очень последовательны. Вы сказали, что волновая функция любой системы эволюционирует во времени совершенно детерминированным образом и что вероятности появляются только тогда, когда мы производим измерения. Но, согласно вашей точке зрения, не только электрон, но также измерительный прибор и человек, производящий с его помощью наблюдения, — все они образуют одну большую систему, описываемую волновой функцией с невероятно большим количеством значений, причем все эти значения меняются причинным образом даже во время измерения. Но если что-то происходит детерминированно, откуда же берется неопределенность в результатах измерений? Откуда берутся вероятности, когда производятся измерения?

* * *

Я испытываю симпатию к обеим сторонам в этом споре, хотя мне ближе реалист Скрудж, а не позитивист Крошка Тим. Я предоставил Крошке Тиму последнее слово, потому что проблема, поднятая им в последних фразах, является одной из самых важных загадок в интерпретации квантовой механики. Ортодоксальная копенгагенская интерпретация, которую я до сих пор излагал, базируется на резком разграничении физической системы, управляемой законами квантовой механики, и прибора, используемого для изучения этой системы

67

и описываемого классически, т. е. согласно законам доквантовой физики. Наша мифическая частица может иметь волновую функцию со значениями как *здесь*, так и *там*, но когда ее наблюдают, она каким-то образом становится с достоверностью равной либо *здесь*, либо *там*, причем совершенно непредсказуемым образом, если не считать вероятностей. Но это различие в подходах к системе, которую наблюдают, и прибору, которым это делают, есть несомненная фикция. Мы полагаем, что квантовая механика управляет всем во Вселенной, не только поведением отдельных электронов, но и поведением измерительных приборов и самих людей, использующих эти приборы. Если волновая функция описывает измерительный прибор, так же как и наблюдаемую систему, и при этом эволюционирует детерминированно по законам квантовой механики даже во время измерения, то, как спрашивает Крошка Тим, откуда же берутся вероятности?

Неудовлетворенность искусственным разделением систем и наблюдателей в рамках копенгагенской интерпретации привела многих ученых к совершенно иной точке зрения, к интерпретации квантовой механики на основе идеи о *множественности миров* или *множественности историй*. Впервые такая интерпретация была представлена в диссертации Хью Эверетта из Принстона. Согласно этой точке зрения, измерения типа *здесь—там* над нашей мифической частицей представляют определенное взаимодействие между частицей и прибором, в результате которого волновая функция комбинированной системы перестраивается так, что имеет заметные значения лишь для двух конфигураций; одно значение соответствует конфигурации, в которой частица находится *здесь* и указатель прибора указывает на *здесь*, другое значение соответствует возможности, что частица находится *там* и прибор показывает *там*. Существует и определенная волновая функция, возникшая совершенно детерминированным образом по законам квантовой механики в результате взаимодействия частицы с измерительным прибором. Однако два значения волновой функции соответствуют двум состояниям с разной энергией, а так как измерительный прибор макроскопический, то разница в энергиях двух состояний очень велика и два значения волновой функции осциллируют на сильно отличающихся частотах. Наблюдение положения указателя на приборе напоминает случайную настройку на одну из двух радиостанций, WZ-ЗДЕСЬ и YX-ТАМ; если несущие частоты достаточно разделены, интерференция не возникает и вы принимаете ту или другую радиостанцию с вероятностью, пропорциональной интенсивности сигнала. Отсутствие интерференции между двумя значениями волновой функции означает, что, по существу, мировая история расщепилась на две истории, в одной из которых частица находится *здесь*, а в другой — *там*, и с этого момента две истории развиваются без взаимодействия друг с другом⁶⁸.

68

Применяя правила квантовой механики к комбинированной системе из частицы и измерительного прибора, можно на самом деле доказать, что вероятность обнаружить частицу *здесь*, а указатель прибора в положении *здесь*, пропорциональна квадрату значения *здесь* волновой функции частицы перед тем самым мгновением, когда она начала взаимодействовать с измерительным прибором, что как раз и постулируется в копенгагенской интерпретации квантовой механики. Однако вопрос Крошки Тима все еще остается без ответа. При вычислении вероятности того, что комбинированная система из частицы и измерительного прибора имеет одну из двух конфигураций, мы неявно все-таки протащили наблюдателя, который считывает показания прибора и обнаруживает надписи *здесь* или *там*. Хотя при этом прибор рассматривается квантово-механически, наблюдатель считается классическим; он обнаруживает, что указатель совершенно определенно указывает либо на *здесь*, либо на *там*, причем это нельзя предсказать заранее иначе как вероятностным образом. Конечно, можно и наблюдателя рассматривать квантово-механически, но ценой введения другого наблюдателя, который детектирует результаты наблюдений первого, читая, например, статью в физическом журнале. И так далее.

Множество физиков работало над тем, чтобы очистить основы квантовой механики от любых утверждений о вероятностях⁶⁹ или каком-то ином интерпретирующем постулате, различающем системы и наблюдателей. То, что требуется,

это квантовомеханическая модель с волновой функцией, описывающей не только различные изучаемые системы, но и как-то учитывающей наличие сознательного наблюдателя. Имея такую модель, можно попытаться показать, что в результате *повторяющихся* взаимодействий наблюдателя с отдельными системами волновая функция комбинированной системы с достоверностью эволюционирует к конечной волновой функции, причем наблюдатель в этом конечном состоянии уверен, что вероятности индивидуальных измерений совпадают с предсказаниями в рамках копенгагенской интерпретации. Я не убежден, что такая программа исследований успешно завершена, но думаю, что это может произойти рано или поздно. И тогда реализм Скруджа одержит полную победу.

Самое удивительное в том, насколько все это не имеет значения. Большинство физиков использует квантовую механику в повседневной работе, не заботясь о фундаментальных проблемах ее интерпретации. Будучи здравомыслящими людьми, имеющими очень мало времени на то, чтобы успевать следить за новыми идеями и данными в своей собственной области, они совершенно не тревожатся по поводу всех этих фундаментальных проблем. Недавно Филип Канделас (с физического факультета Техасского университета) ждал вместе со мной лифт, и разговор зашел о молодом теоретике, подававшем надежды на старших курсах и затем исчезнувшем из вида. Я спросил Фила, что помешало бывшему студенту продолжать исследования.

69

Фил грустно покачал головой и сказал: «Он попытался понять квантовую механику».

Философия квантовой механики настолько не имеет отношения к ее реальному использованию, что начинаешь подозревать, что все глубокие вопросы о смысле измерения на самом деле пусты, порождены несовершенством нашего языка, который создавался в мире, практически управляющемся законами классической физики. Но я признаю, что ощущаю некоторый дискомфорт, всю жизнь используя теорию, которую никто толком не понимает. Нам ведь на самом деле необходимо лучше понимать квантовую механику, если мы хотим заниматься квантовой космологией, т. е. применением квантовой механики ко Вселенной в целом, когда даже вообразить нельзя, что существует какой-то внешний наблюдатель. Сейчас Вселенная слишком огромна для квантовой механики, чтобы это имело значение, но, согласно теории Большого взрыва, в прошлом было время, когда частицы находились настолько близко друг к другу, что квантовые эффекты должны были быть существенными. В наши дни никто даже не знает правил применения квантовой механики в подобной ситуации.

С моей точки зрения, еще интереснее вопрос о том, является ли квантовая механика с необходимостью *истинной наукой*. Квантовая механика имела феноменальный успех при объяснении свойств частиц, атомов и молекул, так что мы уверены, что она является очень хорошим приближением к истине. Но вопрос заключается в том, не существует ли другой логически возможная теория, предсказания которой очень близки, но все же отличаются от предсказаний квантовой механики. Легко придумать способы небольшого изменения почти всех физических теорий. Например, ньютоновский закон тяготения, утверждающий, что сила тяготения между двумя частицами убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, можно немного изменить, предположив, что сила убывает по закону, содержащему другую степень расстояния, которая близка, но все же отличается от степени -2 . Чтобы экспериментально проверить теорию Ньютона, следует сравнить наблюдения над телами Солнечной системы с теми предсказаниями, которые получаются в случае силы, убывающей по закону с некоторой неизвестной степенью расстояния, и таким образом установить предел того, насколько этот закон может отклоняться от закона обратных квадратов. Даже общую теорию относительности можно немного изменить, например включив более сложные малые слагаемые в уравнения поля или введя в теорию новые слабозаимодействующие поля. Поразительно, что до сих пор не удалось найти логически непротиворечивой теории, которая была бы близка к квантовой механике, но при этом отличалась от нее.

Несколько лет тому назад я сам попытался построить такую теорию. У меня не было серьезных намерений предложить альтернативу квантовой механике. Я всего лишь хотел построить хоть *какую-*

70

нибудь теорию, предсказания которой были бы близки, но не совпадали с предсказаниями квантовой механики и которую можно было бы экспериментально проверить. Для этой цели я попытался предложить физикам-экспериментаторам идею такого эксперимента, который мог бы служить интересным количественным тестом справедливости квантовой механики. Когда речь идет о проверке самой квантовой механики, а не какой-то конкретной квантовомеханической теории вроде стандартной модели, то для того, чтобы экспериментально различить квантовую механику и альтернативную теорию, следует проверить выполнение какого-то весьма общего свойства любой конкретной квантовомеханической теории. В поисках альтернативы квантовой механике я вцепился в одно общее свойство этой теории, всегда казавшееся несколько более произвольным, чем другие, а именно в свойство *линейности*.

Нужно сказать несколько слов о смысле линейности. Вспомним, что значения волновой функции любой системы меняются со скоростями, зависящими от этих значений, а также от природы системы и окружающей среды. Например, скорость изменения значения *здесь* волновой функции нашей мифической частицы равна некоторой константе, умноженной на значение *здесь*, плюс другая константа, умноженная на значение *там*. Динамический закон такого конкретного вида называется линейным, так как если начать менять одно значение волновой функции в произвольный момент времени и построить график любого значения волновой функции в любой последующий момент в зависимости от меняющегося значения, то при прочих равных условиях этот график будет прямой линией. Грубо говоря, отклик системы на любое изменение ее состояния пропорционален этому изменению. Одним из очень важных следствий такой линейности, как отмечал Скрудж, является то, что в квантовой механике не возникает хаотического поведения; малое изменение начальных условий приводит только к малым изменениям значений волновой функции в любой последующий момент времени.

Существует множество классических систем, линейных в указанном смысле, но линейность в классической физике никогда не бывает точной. Наоборот, в квантовой механике предполагается, что она линейна при любых обстоятельствах. Если кто-то собирается поискать способы изменения квантовой механики, то естественнее всего попробовать исследовать возможность, что эволюция волновой функции не точно линейна.

После некоторых усилий я построил слегка нелинейную альтернативу квантовой механике, казавшуюся физически осмысленной и легко проверяемой с очень высокой точностью. Тестом служило общее следствие линейности, заключающееся в том, что частоты колебаний любой линейной системы не зависят от способа возбуждения этих колебаний.

Например, Галилей заметил, что частота колебаний

71

маятника не зависит от того, насколько велик размах колебаний. Это верно потому что пока амплитуда колебаний достаточно мала, маятник является линейной системой; скорости изменения его отклонения и его импульса пропорциональны, соответственно, импульсу и отклонению. Все часы используют это свойство колебаний линейных систем, идет ли речь о маятниковых, пружинных или кварцевых часах. Несколько лет назад, после разговора с Дэвидом Уайнлендом из Национального бюро стандартов, я понял, что вращающиеся вокруг своей оси ядра, используемые в Бюро для создания эталонов времени, позволяют осуществить превосходный тест линейности квантовой механики; в моей слегка нелинейной альтернативной теории частота, с которой направление спина ядра прецессирует вокруг направления магнитного поля, должна очень слабо зависеть от угла между спином и магнитным полем. Из того факта, что в Бюро стандартов никогда не наблюдали подобного эффекта, я сделал вывод, что любые нелинейные эффекты в изучавшемся ядре (изотопе бериллия) не могут привести к изменению энергии ядра на величину, большую, чем 10^{-18} (в относительных единицах). После этой моей работы Уайнленд и другие экспериментаторы из Гарварда, Принстона и других лабораторий улучшили точность измерений, так что сейчас мы знаем, что нелинейные эффекты давали бы еще меньший вклад. Таким образом, даже если линейность квантовой механики приближенна, это приближение очень хорошее.

Все это не вызывает особого удивления. Даже если существуют малые нелинейные поправки к законам квантовой механики, нет никаких оснований полагать, что эти поправки окажутся достаточно заметными, чтобы быть обнаруженными в первой же серии нацеленных на это экспериментов. Что меня действительно разочаровало, так это то, что нелинейная альтернатива квантовой механике, как оказалось, содержит внутренние теоретические трудности. Сначала я не сумел найти способ распространить нелинейную версию квантовой механики на теории, основанные на специальной теории относительности Эйнштейна. Затем, уже после того, как была опубликована моя работа, Н. Гизин из Женевы и мой коллега Джозеф Польчински из Техасского университета независимо показали, что в мысленном эксперименте Эйнштейна—Подольского—Розена, упоминавшемся Крошкой Тимом, нелинейные свойства альтернативной теории *могут* быть использованы для мгновенной посылки сигналов на большие расстояния, что безусловно запрещено специальной теорией относительности⁷⁰. В конце концов к настоящему времени я прекратил всякую работу над этой проблемой; я просто не знаю, как можно немного изменить квантовую механику, не разрушив ее в результате до основания.

Этот крах теоретической попытки найти приемлемую альтернативу квантовой механике в еще большей степени, чем точные экс-

72

перименты по проверке линейности, убеждает меня, что квантовая механика такова, какова она есть, потому что любое ее малое изменение обязательно приведет к логическим противоречиям. Если это так, то квантовая механика должна быть постоянной частью физики. Иными словами, квантовая механика должна выжить не как приближение к более глубокой истине, подобно тому, как ньютоновская теория тяготения сохранилась как приближение к эйнштейновской общей теории относительности, а как точно выполняющееся свойство окончательной теории.

ГЛАВА V. Рассказы о теории и эксперименте

*Когда мы стареем,
Мир нам кажется странным. Все сложнее
Понять смерть и жизнь. Ведь жизнь
Не вспышка без до и после,
А пожар без конца и начала.*

Т. Элиот. Ист Кокер

Я хочу теперь рассказать три истории об успехах физики XX в. Из всех этих историй можно извлечь поучительный вывод: физики очень часто руководствуются чувством прекрасного, причем это проявляется не только при создании новых теорий, но даже тогда, когда они судят о применимости уже созданных. Похоже, что мы постоянно учимся тому, как предугадывать красоту природы на самом глубоком уровне. Нет ничего прекраснее сознания, что мы действительно продвигаемся вперед к раскрытию окончательных законов природы.

* * *

Мой первый рассказ — об общей теории относительности (ОТО), иначе говоря эйнштейновской теории тяготения. Эйнштейн создал свою теорию в 1907—1915 гг. и представил ее миру в серии статей 1915—1916 гг. Если говорить очень коротко, то вместо ньютоновской картины тяготения как притяжения между всеми массивными телами общая теория относительности описывает тяготение как эффект, обусловленный кривизной пространства-времени, которую создают и вещество, и энергия. К середине 1920-х гг. эта революционная теория стала общепринятой как правильная теория тяготения, и с тех пор такая точка зрения не изменилась. Как это случилось?

Сразу же, в 1915 г., Эйнштейн заметил, что его теория разрешает старый конфликт между наблюдениями в Солнечной системе

74

и ньютоновской теорией. Еще в 1859 г. было установлено, что поведение орбиты планеты Меркурий не укладывается в рамки ньютоновской теории. Если предположить, что во Вселенной нет ничего, кроме Солнца и одной единственной планеты, то, согласно механике Ньютона и его же теории тяготения, эта планета должна двигаться вокруг Солнца по идеальному эллипсу. Ориентация эллипса, т. е. расположение его большой и малой полуосей в пространстве, никогда не изменяется; все выглядит так, как будто орбита планеты закреплена в пространстве. На самом деле в Солнечной системе имеются другие планеты, которые несколько искажают гравитационное поле Солнца, так что в результате эллиптические орбиты всех планет прецессируют⁷¹, т. е. медленно поворачиваются в пространстве. В XIX в. стало известно, что орбита Меркурия поворачивается на угол, равный примерно 575 угловым секундам за сто лет. (Напомним, что один градус равен 3 600 угловых секунд.) Однако ньютоновская теория предсказывала, что орбита Меркурия должна прецессировать на угол, равный всего лишь 532 угловым секундам за сто лет. Таким образом, возникло расхождение в 43 угловых секунды за столетие. Другой способ осознать этот результат таков: если вы подождете 225 000 лет, то эллиптическая орбита Меркурия, совершив полный оборот на 360°, вернется в исходное положение, в то время как ньютоновская теория предсказывает, что это займет 244 000 лет. Казалось бы, расхождение не так уж и велико, но оно тревожило астрономов на протяжении более чем полувека. Когда Эйнштейн в 1915 г. начал рассматривать следствия своей новой теории, он сразу же сумел объяснить дополнительную прецессию орбиты Меркурия, равную 43 угловым секундам за сто лет. (Один из эффектов, дающих вклад в эту прецессию в теории Эйнштейна, это дополнительное гравитационное поле, порожденное энергией самого гравитационного поля. В ньютоновской теории тяготения гравитационное поле порождается только массой, а не энергией, поэтому такого добавочного гравитационного поля не возникает.) Позднее Эйнштейн вспоминал, что, получив этот результат, он в течение нескольких дней был вне себя от радости.

После Первой мировой войны астрономы подвергли общую теорию относительности дальнейшей экспериментальной проверке, измерив отклонение световых лучей Солнцем во время полного солнечного затмения 1919 г. Согласно эйнштейновской теории фотоны в световом луче отклоняются гравитационными полями. Это похоже на поведение кометы, прилетевшей в Солнечную систему с далекого расстояния. Комета отклоняется гравитационным полем Солнца, совершает вокруг Солнца оборот и в результате опять уходит в межзвездное пространство. Конечно, отклонение луча света намного меньше, чем отклонение кометы, так как свет распространяется намного быстрее. Быстрые кометы тоже отклоняются меньше, чем медленные. Если общая теория относительности верна, то отклонение светового луча,

75

проходящего вблизи поверхности Солнца, должно составлять 1,75 угловых секунд или примерно пять десятитысячных долей градуса. (Чтобы измерить отклонение луча, астрономы вынуждены ждать солнечного затмения, потому что они пытаются наблюдать искривление световых лучей, приходящих от далеких звезд и проходящих вблизи Солнца. Понятно, что трудно увидеть звезды вблизи Солнца, если только солнечный свет не экранируется Луной, как это и бывает во время затмения. Таким образом, астрономы измеряют положение нескольких звезд на небесной сфере за шесть месяцев до затмения, когда Солнце находится на другой стороне неба, а затем шесть месяцев ждут этого затмения и измеряют, насколько лучи света от тех же самых звезд искривили свой путь в результате прохождения рядом с Солнцем, что проявляется в сдвиге видимого положения звезд на небе.) В 1919 г. британские астрономы снарядили экспедиции для наблюдения солнечного затмения в двух местах: в маленьком городе в северо-восточной части Бразилии и на острове в Гвинейском заливе. Они обнаружили, что в пределах экспериментальных погрешностей отклонение лучей света от нескольких звезд соответствует предсказаниям Эйнштейна. С этого момента общая теория относительности получила шумную известность во всем мире и стала предметом бесед в салонах.

Так разве непонятно, почему ОТО вытеснила ньютоновскую теорию тяготения? Новая теория объяснила одну давно известную аномалию, дополнительную прецессию Меркурия, и затем предсказала новый поразительный эффект — отклонение луча света Солнцем. Чего же еще?

Конечно, аномальная прецессия Меркурия и отклонение луча света были очень важной частью всей этой истории. Но,

как всегда бывает в истории науки (а я подозреваю, что и в истории чего угодно), вся простота проблемы испаряется, если присмотреться к ней повнимательнее.

Рассмотрим расхождение между ньютоновской теорией и наблюдаемым движением Меркурия. Даже если мы ничего не знаем об ОТО, разве это расхождение не указывает нам вполне ясно, что что-то неладно с ньютоновской теорией тяготения? Совсем не обязательно. Любая теория вроде ньютоновской теории тяготения имеет такое огромное количество приложений, что все время сталкивается с какими-то экспериментальными аномалиями. Не существует теории, которая не противоречила бы какому-нибудь эксперименту. На протяжении всей своей истории ньютоновская теория Солнечной системы противоречила разным астрономическим наблюдениям. К 1916 г. в число таких расхождений входили не только аномальная прецессия орбиты Меркурия, но и аномалии в движении комет Галлея и Энке, а также в движении Луны. Во всех этих случаях реальное поведение тел не объяснялось ньютоновской теорией. Сейчас мы знаем, что объяснение аномалий в движении комет и Луны не имеет никакого

76

отношения к основам теории тяготения. Кометы Галлея и Энке ведут себя не так, как следует из вычислений с помощью ньютоновской теории, потому что никто не знает, как правильно учесть в этих вычислениях то давление, которое оказывают газы, вылетающие из ядра движущейся по орбите кометы, когда она нагревается, проходя близко от Солнца. Аналогично, движение Луны очень сложно, так как Луна все-таки довольно большое тело и поэтому она подвержена влиянию разного рода сложных приливных сил. Оглядываясь назад, мы не должны удивляться, что при применении ньютоновской теории к этим явлениям возникли расхождения. Кроме того, было несколько предложений, как можно было бы объяснить аномалию в движении Меркурия в рамках ньютоновской теории. Одна из возможностей, серьезно обсуждавшихся в начале века, заключалась в том, что между Меркурием и Солнцем якобы имеется какое-то вещество, слегка искажающее гравитационное поле Солнца. Заметим, что ни одно из расхождений между теорией и экспериментом, образно говоря, не вскакивает, не размахивает флагом и не кричит: «Я самое важное расхождение!» Ученый конца XIX и начала XX вв., критически рассматривавший все данные, не мог с уверенностью прийти к выводу, что в какой-то из известных аномалий в Солнечной системе есть что-то особо важное. Нужна была теория, которая могла бы объяснить, какое же из наблюдений важно на самом деле.

Как только в 1915 г. Эйнштейн показал, что расчет дополнительной прецессии орбиты Меркурия с помощью ОТО приводит к наблюдаемому значению в 43 угловые секунды за сто лет, это сразу же явилось, конечно, серьезным свидетельством в пользу теории. На самом деле, как я поясню ниже, к этому свидетельству следовало бы отнести еще более серьезно. Может быть, из-за обилия других возможных возмущений орбиты Меркурия, может быть, из-за сомнений в ценности теорий, подтверждаемых уже существующими данными, а может быть, просто из-за того, что шла война, но так или иначе успешное объяснение Эйнштейном прецессии Меркурия нельзя и рядом поставить с тем воздействием, которое оказало сообщение экспедиции 1919 г. по изучению солнечного затмения, подтвердившей эйнштейновское предсказание отклонения луча света Солнцем.

Обратимся к этому явлению. Начиная с 1919 г., во время ряда затмений астрономы продолжали проверять предсказание Эйнштейна. Такие затмения наблюдались в Австралии в 1922 г., на острове Суматра в 1929 г., на территории СССР в 1936 г. и в Бразилии в 1947 г. Результаты некоторых наблюдений, похоже, находились в согласии с эйнштейновской теорией, но были и такие, которые существенно с ней расходились. И хотя экспедиция 1919 г. на основе наблюдения дюжины звезд сообщила о 10%-й экспериментальной погрешности в измерении отклонения и о том, что наблюдения согласуются с предсказаниями теории Эйнштейна с такой же 10%-й точностью, неко-

77

торые последующие экспедиции не смогли достичь этой точности, несмотря на то, что наблюдали много больше звезд. Правда, затмение 1919 г. было особенно удобным для таких наблюдений. И все же я склонен считать, что астрономы из экспедиции 1919 г. при анализе своих данных были охвачены чрезмерным энтузиазмом в отношении ОТО.

Действительно, многие ученые того времени скептически относились к данным, полученным во время затмения 1919 г. В докладе Нобелевскому комитету в 1921 г.⁷² Сванте Аррениус упоминал многочисленную критику обнародованных результатов по измерению отклонения лучей света. Однажды в Иерусалиме я встретил престарелого профессора Самбургского, который в 1919 г. был коллегой Эйнштейна в Берлине. Он рассказал мне, что астрономы и физики в Берлине весьма сомневались в том, что британским астрономам удалось на самом деле осуществить столь аккуратную проверку теории Эйнштейна.

Я и в мыслях не могу допустить, что в эти наблюдения вкрался какой-то сознательный обман. Вы только представьте себе все те неопределенности, с которыми вы сталкиваетесь, пытаясь измерить отклонение луча света Солнцем. Вы наблюдаете звезду, находящуюся на небе рядом с солнечным диском в тот момент, когда Солнце заслоняется Луной. Вы должны сравнить положение звезды на двух фотопластинках, сделанных с интервалом в шесть месяцев. Во время этих двух наблюдений телескоп может быть чуть по-разному сфокусирован. Сами фотопластинки могут быть чуть передержаны или недодержаны. И так далее. Как и в любом другом эксперименте, необходимо учитывать все мыслимые поправки. Астрономы вносят эти поправки, опираясь на имеющиеся у них знания. Но когда знаешь ответ, возникает естественное желание вносить поправки лишь до тех пор, пока не получится «правильное» значение, а затем перестать искать другие поправки. Так, астрономов из экспедиции 1919 г. обвиняли в подгонке⁷³ за то, что они отбросили данные, полученные с одной из фотопластинок и расходившиеся с теорией Эйнштейна, и списали расхождение на счет изменения фокуса телескопа. Задним числом можно, конечно, сказать, что британские астрономы оказались правы, но я не удивился бы, если бы узнал, что они продолжали искать поправки лишь до тех пор, пока их результат с учетом всех поправок не совпал с теорией Эйнштейна.

Считается общепринятым мнение, что истинной проверкой теории является сравнение ее предсказаний с результатами экспериментов. Однако, оглядываясь назад, можно утверждать, что успешное объяснение Эйнштейном в 1915 г. ранее измеренной аномалии орбиты Меркурия явилось значительно более существенным тестом общей теории относительности, чем проверка его вычислений отклонения света в наблюдениях во время солнечных затмений 1919 г. и далее. Таким образом, в случае общей теории относительности *последующее подтверждение*, т.е. вычисление уже известного аномального

движения Меркурия, оказалось на самом деле более важной проверкой теории, чем *предсказание* нового эффекта отклонения луча света гравитационными полями⁷⁴.

Я думаю, что все так подчеркивают важность предсказания при проверке научных теорий, потому что стандартная точка зрения научных комментаторов заключается в том, чтобы не доверять теоретикам. Все боятся, что теоретик может подогнать свою теорию так, что она будет объяснять любые известные экспериментальные факты. Таким образом, то, что теория объясняет эти факты, не считается убедительным тестом самой теории.

Однако, несмотря на то, что Эйнштейн еще в 1907 г. изучил вопрос об аномальной прецессии орбиты Меркурия, никто из тех, кто хоть немного знает, как строилась общая теория относительности, кто пытался вникнуть в логику Эйнштейна, не может предположить, что он занимался созданием общей теории относительности для того, чтобы объяснить эту прецессию. (Я вернусь через минуту к ходу мыслей Эйнштейна.) Часто следует не доверять именно успешному *предсказанию*. Правда, что в случае настоящего предсказания, вроде эйнштейновского предсказания отклонения лучей света Солнцем, теоретик не знает никаких экспериментальных данных, строя свою теорию. Но с другой стороны, экспериментатор знает теоретический результат до того, как он начинает эксперимент. А это может привести, и, как показывает история науки, приводило к искажениям из-за чрезмерного доверия к вычислениям, сделанным задним числом. Я повторяю: экспериментаторы не фальсифицируют свои данные. Насколько мне известно, в истории физики не было случая, чтобы какие-то важные данные сознательно искажались. Но если экспериментаторы знают тот результат, который они теоретически ожидают получить, то им, естественно, очень трудно прекратить поиски ошибок наблюдения, если этот результат не получается, или, наоборот, продолжать такие поиски, если обнаружено совпадение с предсказанием. То, что экспериментаторы все же не всегда получают те результаты, которые ожидают, свидетельствует о силе их характера.

Подведем предварительные итоги. Мы видели, что первые экспериментальные свидетельства в пользу общей теории относительности⁷⁵ сводились к единственному успешному вычислению задним числом аномалии в движении Меркурия, которое не было воспринято достаточно серьезно, и предсказанию нового эффекта отклонения луча света Солнцем, кажущееся успешное подтверждение которого вызвало много шума, однако на самом деле было отнюдь не таким убедительным, как в то время считалось. По крайней мере несколько ученых встретили его со скептицизмом. Только после Второй мировой войны, благодаря развитию новой радарной техники и радиоастрономии, удалось существенно продвинуться в увеличении точности этих экспериментальных тестов общей теории относительности⁷⁶.

Сегодня можно утверждать, что предсказания общей теории относительности для отклонения (и одновременно задержки) луча света, проходящего рядом с Солнцем, для аномалий орбитального движения как Меркурия, так и астероида Икар и других естественных и искусственных тел, подтверждены с экспериментальной неопределенностью менее 1 %. Но в 1920-е гг. до этого было еще далеко.

Тем не менее, несмотря на слабость экспериментальной поддержки, теория Эйнштейна еще в 1920-е гг. вошла в стандартные учебники и с тех пор не сдавала свои позиции, невзирая на то, что разные экспедиции по наблюдению за солнечными затмениями в 1920—1930 гг. сообщали, по меньшей мере, о сомнительном согласии с теорией. Помню, что, когда в 1950-х гг., еще до появления новых впечатляющих подтверждений теории, полученных с помощью современных радаров и радиоастрономии, я изучал общую теорию относительности, я принимал как данное, что эта теория более или менее верна. Возможно, мы все были тогда доверчивы и легкомысленны, но думаю, что объяснение не в этом. Я уверен, что широкое признание ОТО было связано главным образом с привлекательностью самой теории, проще говоря с ее красотой.

Развивая общую теорию относительности, Эйнштейн следовал линии рассуждений, которую могли проследить и физики последующих поколений, желавшие разобраться в этой теории. Более того, в этих рассуждениях они увидели бы те же притягательные черты, которые в свое время привлекли внимание Эйнштейна. Историю можно проследить назад до 1905 г., *annus mirabilis* Эйнштейна. В этом году, одновременно с развитием квантовой теории света и теории движения малых частиц в жидкостях⁷⁷, Эйнштейн развил новый взгляд на пространство и время, известный нам сейчас под названием специальной теории относительности. Эта теория находилась в согласии с общепринятой теорией электричества и магнетизма — электродинамикой Максвелла. Наблюдатель, движущийся с постоянной скоростью, наблюдал бы, что пространственно-временные интервалы и электромагнитные поля изменяются за счет скорости движения наблюдателя таким образом, что уравнения Максвелла остаются справедливыми (что и не удивительно, так как специальная теория относительности строилась именно так, чтобы удовлетворить этому требованию). Однако специальная теория относительности была совершенно несовместима с ньютоновской теорией тяготения. С одной стороны, в теории Ньютона сила тяготения между Солнцем и планетой зависит от расстояния между положениями этих тел, измеренными *в один и тот же момент времени*, а с другой стороны, в специальной теории относительности нет понятия абсолютной одновременности — разные наблюдатели, в зависимости от того, как они движутся, будут наблюдать одно и то же событие происходящим раньше, одновременно или позже другого.

Имелось несколько способов так изменить теорию Ньютона, чтобы привести ее в согласие с специальной теорией относительности. Сам Эйнштейн испробовал по крайней мере один из них, прежде чем создал общую теорию относительности⁷⁸. Ключевой идеей, с которой начался в 1907 г. путь к ОТО, стало знакомое и проверенное свойство тяготения: сила тяготения пропорциональна массе того тела, на которое она действует. Эйнштейн понял, что это напоминает свойства так называемых сил инерции, которые действуют на нас тогда, когда мы движемся с переменной скоростью или меняем направление движения. Именно сила инерции прижимает пассажиров к спинкам кресел во время разбега самолета. Другим примером силы инерции является центробежная сила, не дающая Земле упасть на Солнце. Все силы инерции, как и силы тяготения, пропорциональны массам тех тел, на которые они действуют. Мы на Земле не ощущаем ни гравитационного поля Солнца, ни центробежной силы, вызванной движением Земли вокруг Солнца, так как эти две силы уравновешивают друг друга. Однако баланс нарушился бы, если бы одна сила была пропорциональна массе объекта, на который она действует, а другая — нет. В этом случае некоторые тела могли бы падать с Земли на Солнце, а другие, наоборот,

отбрасываться от Солнца в межзвездное пространство. В общем случае тот факт, что и силы тяготения, и силы инерции пропорциональны массе того тела, на которое они действуют, и не зависят более ни от каких свойств тел, позволяет ввести в каждой точке произвольного гравитационного поля «свободно падающую систему отсчета», в которой не ощущаются ни силы тяготения, ни силы инерции, так как они точно уравновешивают друг друга для любых тел. Когда мы ощущаем силы тяготения или силы инерции, это означает, что мы не находимся в свободно падающей системе отсчета. Например, на поверхности Земли свободно падающие тела ускоряются в направлении к центру Земли с ускорением примерно 10 м/с^2 . Мы ощущаем тяготение Земли до тех пор, пока сами не начнем двигаться вниз с тем же самым ускорением, т. е. начнем свободное падение. Эйнштейн совершил логический скачок и предположил, что если посмотреть в корень, то силы тяготения и силы инерции это одно и то же. Это утверждение Эйнштейн назвал принципом эквивалентности инерции и тяготения, или коротко принципом эквивалентности. Согласно этому принципу, всякое гравитационное поле полностью задается описанием того, какая система отсчета является свободно падающей в каждой точке пространства-времени.

Почти десять лет после 1907 г. Эйнштейн провел в поисках соответствующего этим идеям математического аппарата. Наконец ему удалось найти то, что требовалось, в глубокой аналогии между ролями гравитации в физике и кривизны в геометрии. То, что с помощью выбора подходящей свободно падающей системы отсчета можно добиться, что сила тяготения на короткое время исчезает в малой окрест-

81

ности любой точки в гравитационном поле, очень похоже на свойство кривых поверхностей, заключающееся в том, что всегда можно сделать карту этой поверхности, на которой вблизи любой точки будут правильно изображены все расстояния и направления. Если поверхность кривая, то ни одна карта не способна правильно отобразить расстояния и направления везде; всякая карта большой области является компромиссом, в большей или меньшей степени искажающим расстояния и направления. Знакомая всем проекция Меркатора, используемая при создании географических карт Земли, дает достаточно точное представление об истинных расстояниях и направлениях вблизи экватора, но чудовищно искажает картину вблизи полюсов, так что в результате Гренландия распухает во много раз больше своего истинного размера. Точно так же одним из признаков того, что вы находитесь в гравитационном поле, является невозможность найти *единственную* свободно падающую систему отсчета, в которой везде полностью скомпенсированы гравитационное поле и эффекты инерции⁷⁹.

Начав с этой аналогии между тяготением и кривизной, Эйнштейн пришел к выводу, что тяготение есть не что иное, как проявление кривизны пространства и времени. Для развития этой идеи ему потребовалась математическая теория искривленных пространств, обобщающая знакомую геометрию сферической двумерной поверхности Земли. Эйнштейн был величайшим физиком мира со времен Ньютона, естественно, он знал математику так же, как и большинство физиков его времени, но все же математиком он не был. В конце концов точно то, что ему требовалось, нашлось в полностью разработанной Риманом и другими математиками предыдущего столетия теории искривленных пространств. В окончательной форме общая теория относительности стала просто новой интерпретацией существовавшей математической теории искривленных пространств в терминах тяготения, дополненной *полевым уравнением*, определявшим кривизну, создаваемую любым данным количеством вещества и энергии. Существенно, что для Солнечной системы с ее малой плотностью и малыми скоростями движения планет общая теория относительности приводила в точности к тем же результатам, что и теория Ньютона, так что две теории отличались только крохотными эффектами вроде прецессии орбит или отклонения луча света.

У меня есть еще, что сказать дальше по поводу красоты общей теории относительности. Пока что я надеюсь, что сказал достаточно, чтобы дать читателю возможность почувствовать привлекательность этих идей. Думаю, что именно эта внутренняя привлекательность и поддерживала веру физиков в ОТО в течении десятилетий, когда данные, полученные после очередных солнечных затмений, выглядели все более разочаровывающими.

Такое впечатление еще более усиливается, если посмотреть на то, как воспринимали общую теорию относительности в первые годы ее

82

существования *до* результатов экспедиции по изучению затмения 1919 г. Самым важным было то, как сам Эйнштейн воспринимал свою теорию. В открытке, адресованной более старшему теоретику Арнольду Зоммерфельду и датированной 8 февраля 1916 г., Эйнштейн писал: «Вы убедитесь в справедливости общей теории относительности сразу же, как только ее изучите. Поэтому я ни единым словом не собираюсь ее защищать». Я, конечно, не могу знать, до какой степени успешное вычисление прецессии орбиты Меркурия в 1916 г. повлияло на уверенность Эйнштейна в справедливости ОТО, но ясно, что задолго до того, как он сделал это вычисление, что-то должно было укреплять его веру в идеи, которые легли в основу теории, и толкало на дальнейшую работу. Этим чем-то могла быть только привлекательность самих идей.

Не следует недооценивать такую раннюю уверенность. История науки знает бесчисленное количество примеров ученых, у которых были хорошие идеи, но они не стали их развивать в свое время, хотя через много лет обнаруживалось (часто совсем другими людьми), что эти идеи приводят к заметному прогрессу в науке. Общепространенной ошибкой является предположение, что ученые обязательно яростно защищают собственные идеи. Очень часто ученый, выдвинувший новую идею, сам подвергает ее необоснованной или избыточной критике только потому, что если начать эту идею серьезно развивать, то тогда нужно долго и упорно работать, причем (что более важно) забросив при этом все остальные исследования.

На самом деле общая теория относительности *произвела глубокое впечатление* на физиков. Многие выдающиеся специалисты в Германии и других странах узнали об ОТО и отнеслись к ней как к многообещающей и важной теории задолго до экспедиции 1919 г. Среди этих специалистов были не только Зоммерфельд в Мюнхене, Макс Борн и Давид Гильберт в Гёттингене и Хендрик Лоренц в Лейдене, с каждым из которых Эйнштейн общался во время войны, но и Поль Ланжевэн во Франции и Артур Эддингтон в Англии (именно он организовал экспедицию 1919 г.). Очень показательны предложения о присуждении Эйнштейну Нобелевской премии, поступавшие начиная с 1916 г. Так, в 1916 г. Феликс Эренгафт выдвинул Эйнштейна на Нобелевскую премию за его теорию броуновского движения, а также за специальную и общую теории относительности. В 1917 г. А. Гааз выдвинул его за общую теорию относительности (отмечая как свидетельство правильности теории успешное вычисление прецессии орбиты Меркурия). В том же 1917 г. Эмиль Вартбург

выдвинул Эйнштейна за многочисленные вклады в науку, включая общую теорию относительности. Еще ряд подобных выдвиганий последовал в 1918 г. Наконец, в 1919 г., за четыре месяца до экспедиции по изучению затмения Солнца, Макс Планк, один из отцов современной физики, выдвинул Эйнштейна

83

за создание общей теории относительности, прокомментировав это словами, что «Эйнштейн сделал первый шаг за круг теории Ньютона».

Я совершенно не утверждаю, что мировое сообщество физиков было с самого начала полностью и безоговорочно убеждено в справедливости ОТО. Например, в докладе Нобелевского комитета за 1919 г. предлагалось подождать до солнечного затмения 29 мая 1919 г., прежде чем принимать решение по поводу ОТО. Даже после 1919 г., когда Эйнштейну все-таки присудили Нобелевскую премию, ее дали ему не за создание специальной и общей теорий относительности, а «за его вклад в теоретическую физику, в частности за открытие закона фотоэлектрического эффекта».

На самом деле не так уж и важно точно установить момент, когда физики на 75, на 90 или на 99 % убедились в истинности ОТО. Важным для прогресса в науке является не решение о том, что теория верна, а решение, что к этой теории следует отнестись серьезно, т. е. что она заслуживает того, чтобы рассказывать ее студентам, писать о ней учебники, наконец, использовать в собственных исследованиях. С этой точки зрения самой важной победой, одержанной ОТО на первых порах, было обращение в новую веру многих физиков (не считая самого Эйнштейна), в том числе британских астрономов. Они убедились не столько в том, что ОТО верна, сколько в том, что она приемлема и достаточно красива для того, чтобы посвятить проверке ее предсказаний значительную часть своих исследований и уехать за тысячи миль от Англии, чтобы наблюдать солнечное затмение 1919 г. Но еще до завершения общей теории относительности и успешного вычисления прецессии орбиты Меркурия красота эйнштейновской теории настолько захватила Эрвина Фрейндлиха из Королевской обсерватории в Берлине, что он снарядил на деньги Круппа экспедицию в Крым для наблюдения солнечного затмения 1914 г. (Война прервала его наблюдения, и за все свои старания Фрейндлих был временно задержан в России.)

Восприятие общей теории относительности зависело не от экспериментальных данных, как таковых, и не от внутренних качеств, присущих теории, а от сложного переплетения теории и эксперимента. Я подчеркиваю теоретическую сторону дела в противовес наивной переоценке экспериментальных данных. Ученые и историки науки уже давно отказались от старого тезиса Френсиса Бэкона, что научная гипотеза должна исследоваться путем терпеливого и беспристрастного наблюдения над природой. Совершенно очевидно, что Эйнштейн не копался в астрономических данных, создавая ОТО. И все же широко распространена точка зрения Джона Стюарта Милля, что *проверить* наши теории можно только с помощью наблюдений. Но, как мы видели, в отношении к ОТО эстетические суждения и экспериментальные данные были неразрывно связаны.

84

В определенном смысле с самого начала имелось огромное количество экспериментальных данных в поддержку ОТО, а именно наблюдения траекторий движения Земли вокруг Солнца, Луны вокруг Земли, а также все остальные детальные измерения в Солнечной системе, начатые еще Тихо Браге и его предшественниками и уже объясненные ньютоновской теорией. На первый взгляд подобные свидетельства могут показаться очень странными. Ведь мы не просто говорим о свидетельствах в пользу ОТО, заключающихся в сделанных задним числом вычислениях планетных движений, уже измеренных к тому времени, когда была создана теория. Нет, мы говорим сейчас об астрономических наблюдениях, не только сделанных до того, как Эйнштейн сформулировал свою теорию, но уже объясненных другой теорией, созданной Ньютоном. Как же может быть, чтобы успешное предсказание или объяснение задним числом подобных наблюдений могло расцениваться как триумф именно общей теории относительности?

Чтобы это понять, нам нужно повнимательнее присмотреться к теориям Ньютона и Эйнштейна. Ньютоновская физика сумела объяснить практически все наблюдаемые движения в Солнечной системе, однако сделала это ценой введения ряда довольно произвольных предположений. Например, рассмотрим закон, утверждающий, что сила тяготения, действующая со стороны некоторого тела на другое тело, убывает как квадрат расстояния между ними. В теории Ньютона нет ничего, что принуждало бы к выбору именно закона обратных квадратов. Сам Ньютон предложил этот закон, чтобы объяснить известные факты, касающиеся Солнечной системы, например закон Кеплера, связывающий размеры орбит планет со временем их обращения вокруг Солнца. Если же не обращать внимания на данные наблюдений, то в теории Ньютона можно заменить закон обратных квадратов законом обратных кубов или законом с показателем степени 2,01 в знаменателе без малейшего ущерба для основ самой теории⁸⁰. Изменились бы лишь мелкие детали. Теория Эйнштейна значительно менее произвольна, она очень жестко построена. Если рассматривать медленно движущиеся тела в слабом гравитационном поле, когда мы, собственно, и можем говорить об обычной силе тяготения, то из уравнений общей теории относительности *вытекает*, что сила обязана уменьшаться по закону обратных квадратов. Невозможно без насилия над основными положениями теории так изменить ОТО, чтобы получить вместо закона обратных квадратов какую-то иную зависимость силы тяготения от расстояния.

Далее, как особо подчеркивал Эйнштейн в своих работах, тот факт, что сила тяготения, действующая на тело малых размеров, пропорциональна только массе этого тела и не зависит ни от каких других его свойств, выглядит в теории Ньютона достаточно произвольным. В рамках этой теории гравитационная сила могла бы зависеть от раз-

85

меров, формы или химического состава тела, и это не привело бы к потрясению основ. В теории Эйнштейна сила тяготения, действующая на тело, *обязана* быть пропорциональной массе тела и не зависеть от любых иных его свойств¹⁾; если бы это было не так, силы тяготения и силы инерции по-разному действовали бы на разные тела и было бы невозможно говорить о свободно падающей системе отсчета, в которой ни одно тело не испытывает действия сил тяготения. Это, в свою очередь, не позволило бы интерпретировать тяготение как геометрический эффект кривизны пространства-времени. Еще раз повторим, что теория Эйнштейна обладает значительно большей жесткостью, чем теория Ньютона. Именно по этой причине Эйнштейн имел право полагать, что именно ему удалось объяснить обычные движения тел в Солнечной системе так, как не мог этого сделать Ньютон.

К сожалению, очень трудно точно сформулировать понятие жесткости физической теории. И Ньютон, и Эйнштейн знали общие свойства движения планет до того, как они сформулировали свои теории; более того, Эйнштейн знал, что он должен

получить для силы тяготения что-то похожее на закон обратных квадратов, с тем, чтобы его теория воспроизводила успехи теории Ньютона. Наконец, он знал, что нужно как-то разобраться с зависимостью гравитационной силы от массы. Лишь рассматривая всю окончательно завершённую теорию в целом, можно сказать, что ОТО объяснила закон обратных квадратов или пропорциональность гравитационной силы массе тела, но все равно это суждение остается делом вкуса и интуиции. Ведь оно на самом деле сводится к утверждению, что, если изменить теорию Эйнштейна так, чтобы допустить иной закон вместо закона обратных квадратов или допустить непропорциональность силы тяготения массе тела, то теория станет невыносимо безобразной. Итак, высказывая суждения о значении тех или иных данных, мы снова используем эстетические оценки и наше общее теоретическое наследие.

* * *

Мой следующий рассказ посвящен квантовой электродинамике — квантово-механической теории взаимодействия электронов и света. В определенном смысле это зеркальное отражение предыдущего рассказа. В течение сорока лет общая теория относительности рассматривалась как правильная теория тяготения, несмотря на скудость свидетельств в ее пользу, и происходило это потому, что теория была неотразимо прекрасна. В противоположность этому квантовая электродинамика сразу же нашла подтверждение в огромном количестве экспериментальных данных, но несмотря на это двадцать лет

¹⁾ Строго говоря, это верно только для медленно движущихся тел малых размеров. Для тел, движущихся с большой скоростью, сила тяготения зависит также от их импульса. Именно поэтому гравитационное поле Солнца способно отклонять лучи света, так как они обладают импульсом, но не массой.

86

к ней относились с большим недоверием из-за внутренних теоретических противоречий, которые, казалось, могли быть разрешены только очень некрасивым образом.

В 1926 г. в одной из первых работ по квантовой механике, так называемой «работе троих» (*Dreimännerarbeit*), авторами которой были Макс Борн, Вернер Гейзенберг и Паскуаль Йордан, эта теория была применена для описания электрического и магнитного полей. Удалось показать, что энергия и импульс электрического и магнитного полей в луче света распространяются сгустками⁸¹, ведущими себя как частицы, и подтвердить, таким образом, справедливость идеи Эйнштейна, высказанной им в 1905 г., о частицах света — фотонах. Другой главной составной частью квантовой электродинамики стала созданная в 1928 г. теория Поля Дирака. В первоначальной форме эта теория показала, каким образом совместить квантовомеханическое описание электронов на языке волновых функций с требованиями специальной теории относительности. Одним из важнейших следствий теории Дирака было то, что для каждого сорта заряженных частиц вроде электрона должна существовать частица той же массы, но с противоположным по знаку зарядом, — так называемая античастица. Античастица к электрону была открыта в 1932 г. и называется позитроном. В конце 20-х — начале 30-х гг. квантовая электродинамика была использована для расчета множества физических процессов (например, рассеяние фотона при столкновении с электроном, рассеяние одного электрона другим, аннигиляция или рождение электрона и позитрона), причем результаты расчетов в целом находились в прекрасном согласии с экспериментом.

Тем не менее к середине 1930-х гг. возобладала точка зрения, что квантовую электродинамику можно рассматривать всерьез только как некоторое приближение, справедливое лишь для реакций с участием фотонов, электронов и позитронов достаточно малых энергий. Трудность, с которой столкнулись ученые, была непохожа на обычные трудности, о которых рассказывают в популярных трудах по истории науки, когда возникают противоречия между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными. В данном случае существенное противоречие возникло внутри самой физической теории. Это была проблема бесконечностей.

Существование этой проблемы в разных формах отмечалось Гейзенбергом и Паули, а также шведским физиком Айваром Валлером, но наиболее ясно и тревожно она прозвучала в 1930 г. в работе молодого американского физика-теоретика Роберта Юлиуса Оппенгеймера. В этой работе Оппенгеймер попытался использовать квантовую электродинамику для расчета одного тонкого эффекта, связанного с энергиями атомов. Электрон в атоме способен испустить квант света, фотон, затем некоторое время покрутиться по орбите и вновь поглотить этот фотон (похоже на игрока в американский футбол,

87

который подхватывает мяч, брошенный им самим же). Фотон никогда не покидает пределы атома, и мы можем судить о его существовании только косвенно, по тому влиянию, которое он оказывает на такие свойства атома, как его энергия или создаваемое им магнитное поле. (Такие фотоны называются *виртуальными*.) Согласно правилам квантовой электродинамики, этот процесс приводит к сдвигу энергии атомного состояния, причем величина его может быть представлена в виде суммы бесконечного числа вкладов⁸², каждый из которых соответствует каждому возможному значению энергии виртуального фотона, которая ничем не ограничена. Оппенгеймер обнаружил при вычислении, что так как в сумму дают вклад слагаемые, отвечающие фотонам неограниченно большой энергии, то и сама сумма оказывается бесконечной, что в результате приводит к бесконечно большому сдвигу энергии атома²⁾. Высокие энергии соответствуют малым длинам волн; так как ультрафиолетовый свет имеет меньшую длину волны, чем видимый, возникновение такой бесконечности называли *ультрафиолетовой катастрофой*.

В 30-е и в начале 40-х гг. большинство физиков сходилось во мнении, что появление ультрафиолетовой катастрофы в расчетах Оппенгеймера и других просто свидетельствует о том, что нельзя доверять существующей теории фотонов и электронов, если энергия этих частиц превышает несколько миллионов электрон-вольт. Сам Оппенгеймер горячо отстаивал такую точку зрения. Отчасти это было связано с тем, что Оппенгеймер был одним из лидеров в изучении космических лучей, высокоэнергичных частиц, проникающих в атмосферу Земли из космоса. Исследование того, как частицы космического излучения взаимодействуют с атмосферой, указывало на странное поведение частиц высокой энергии. Действительно, странности были, но они не имели никакого отношения к проблемам применимости квантовой теории электронов и фотонов, на самом деле необычные явления были свидетельствами рождения частиц нового типа, которые мы сейчас называем мюонами. Но даже после того, как в 1937 г. мюоны были открыты, все равно считалось, что при попытке применить квантовую электродинамику к электронам и фотонам больших энергий происходит что-то не то.

Проблему бесконечностей можно было бы решить с помощью грубой силы, просто постановив, что электроны могут

испускать и поглощать только фотоны, энергия которых ниже некоторого граничного значения. Все успехи, достигнутые в 1930-е гг. квантовой электродинамикой в объяснении взаимодействий электронов и фотонов, относились к процессам с участием фотонов низких энергий, так что эти успехи могли быть сохраниены, если предположить, что

²⁾ Отнюдь не каждая сумма бесконечного числа слагаемых сама бесконечно велика. Например, хотя сумма $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots$ действительно бесконечна, но сумма $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots$ оказывается вполне конечной величиной.

88

граничное значение энергий фотонов достаточно велико, например 10 миллионов электрон-вольт. При таком выборе предела энергии виртуальных фотонов квантовая электродинамика предсказывала бы очень маленькие сдвиги энергии атомов. В то время никто еще не мог измерить энергии атомов с необходимой точностью, чтобы проверить, существуют или нет эти крохотные сдвиги энергии, так что вопрос о расхождениях с опытом не возникал. (На самом деле отношение к квантовой электродинамике было столь пессимистичным, что никто и не пытался вычислить величину этих сдвигов.) Беспокойство в связи с подобным решением проблемы бесконечностей возникало не из-за конфликта с опытом, а из-за того, что предлагаемый выход из положения был слишком произволен и слишком уродлив.

В физической литературе 1930-х и 1940-х гг. можно обнаружить множество других возможных, но малопривлекательных решений проблемы бесконечностей, включая даже теории, в которых бесконечности, связанные с испусканием и последующим поглощением фотонов, сокращались с вкладом других процессов, имевших отрицательную вероятность. Ясно, что понятие отрицательной вероятности не имеет смысла; попытка ввести это понятие в физику есть мера отчаяния, ощущавшегося в связи с проблемой бесконечностей.

Найденное в конце концов решение проблемы бесконечностей, появившееся в конце 1940-х гг. ⁸³, было значительно более естественным и совсем не революционным. Эта проблема вышла на передний план в начале июня 1947 г. во время конференции, проводившейся в гостинице «Баранья голова» в Шелтер Айленде. Конференция была организована с целью собрать вместе физиков, готовых после войны вновь начать думать над фундаментальными проблемами. Случилось так, что эта конференция стала наиболее важной из всех после знаменитой Сольвеевской конференции, состоявшейся пятнадцатью годами ранее в Брюсселе, когда Эйнштейн и Бор вели битву титанов по поводу будущего квантовой механики.

Среди физиков, принимавших участие в конференции в Шелтер Айленде, был Уиллис Лэмб, молодой экспериментатор из Колумбийского университета. Используя микроволновую радарную технологию, разработанную во время войны, Лэмб сумел как раз перед началом конференции очень точно измерить один из эффектов ⁸⁴, который пытался еще в 1930 г. рассчитать Оппенгеймер, а именно сдвиг энергии атома водорода благодаря испусканию и последующему поглощению фотона. Этот эффект известен теперь под названием лэмбовского сдвига. Проведенные измерения сами по себе не имели никакого отношения к решению проблемы бесконечностей, но побудили физиков вновь попытаться вступить в схватку с этой задачей, чтобы вычислить измеренное значение лэмбовского сдвига. Найденное тогда решение проблемы определило развитие физики до наших дней.

89

Ряд теоретиков, принимавших участие в конференции в Шелтер Айленде, уже были наслышаны о результатах Лэмба и приехали на конференцию с готовой идеей того, как можно было бы вычислить лэмбовский сдвиг, пользуясь принципами квантовой электродинамики и обойдя при этом проблему бесконечностей. Рассуждения были таковы. На самом деле тот сдвиг энергии атома, который происходит в результате испускания и последующего поглощения фотонов, не является непосредственно наблюдаемым; в действительности единственной наблюдаемой в эксперименте величиной является полная энергия атома, которая рассчитывается добавлением этого сдвига к той энергии, которую вычислил еще в 1928 г. Дирак. Эта полная энергия зависит от *голой массы* и *голового заряда* электрона, т. е. от тех величин, которые входят в уравнения теории до того, как мы начинаем рассматривать проблемы испускания и последующего поглощения фотонов. Но ведь свободные электроны, так же как и электроны, находящиеся в атомах, все время испускают и вновь поглощают фотоны, что влияет на массу и заряд электронов. Поэтому значения голых массы и заряда совсем не равны измеренным на опыте значениям массы и заряда электрона, которые приводятся в таблицах элементарных частиц. На самом деле, чтобы получить наблюдаемые (естественно, конечные) значения массы и заряда электрона, нужно потребовать, чтобы голые масса и заряд были сами бесконечно большими. Таким образом, полная энергия атома представляется в виде суммы двух слагаемых, каждое из которых бесконечно велико: голой энергии, которая бесконечна, так как зависит от бесконечно больших по величине голых массы и заряда, и сдвига энергии, вычисленного Оппенгеймером, который бесконечно велик, так как в него вносят вклад виртуальные фотоны сколь угодно большой энергии. Возникает вопрос: может ли быть так, что две эти бесконечности сокращают друг друга, приводя к конечной полной энергии? ⁸⁵

На первый взгляд ответ казался отрицательным. Но Оппенгеймер кое-что проглядел в своих вычислениях. Сдвиг энергии обусловлен не только вкладом процессов, в которых электрон испускает и затем вновь поглощает фотон, но и процессов, в которых спонтанно, из вакуума, рождаются позитрон, фотон и другой электрон, а затем фотон поглощается при аннигиляции позитрона и исходного электрона. На самом деле этот удивительный процесс обязательно *должен* быть включен в вычисления, чтобы окончательный ответ для энергии атома зависел от его скорости так, как этого требуют законы специальной теории относительности. (Это один из примеров, иллюстрирующих важнейшее утверждение, много лет назад доказанное Дираком, что квантовомеханическая теория электрона совместима с специальной теорией относительности, только если в теории на равных правах рассматривается и позитрон, античастица к электрону.) Одним из теоретиков, присутствовавших на конференции, был Виктор Вайскопф.

90

Еще в 1936 г. он вычислил вклад в сдвиг энергии за счет процесса с участием позитронов и обнаружил, что этот вклад почти сокращает ту бесконечность, которую получил Оппенгеймер ³⁾. Теперь уже было не очень трудно догадаться, что если учесть процессы с позитронами и принять во внимание разницу между голыми массой и зарядом электрона и их наблюдаемыми значениями, то все бесконечности в сдвиге энергии взаимно сократятся.

Хотя Оппенгеймер и Вайскопф присутствовали на конференции в Шелтер Айленде, все же первым теоретиком,

вычислившим величину лэмбовского сдвига, стал Ганс Бете, уже известный своими работами по ядерной физике, в том числе описанием в 1930 г. тех цепочек ядерных реакций, которые позволяют звездам светиться. Основываясь на циркулировавших на конференции идеях, Бете в вагоне поезда, увозившего его домой, сделал грубое вычисление величины того сдвига, который измерил Лэмб. Бете еще не владел по-настоящему эффективной техникой вычислений, включающей позитроны и учитывающей другие эффекты специальной теории относительности, так что выполненная в поезде работа во многом следовала идеям Оппенгеймера семнадцатилетней давности. Разница заключалась в том, что в тот момент, когда в вычислениях возникли бесконечности, Бете просто отбросил вклад в энергетический сдвиг, обусловленный испусканием и поглощением фотонов больших энергий (он совершенно произвольно ограничил энергии фотонов величиной, эквивалентной массе электрона). В результате Бете получил конечный результат, оказавшийся в удивительном согласии с измерениями Лэмба. Подчеркнем, что само это вычисление мог бы прекрасно сделать и Оппенгеймер в 1930 г., но потребовались экспериментальные данные, требовавшие своего немедленного объяснения, и воодушевление идеями, носившимися в воздухе на конференции в Шелтер Айленде, чтобы подтолкнуть кого-то к доведению работы до конца.

Вскоре физики сделали более аккуратное вычисление лэмбовского сдвига⁸⁶, включавшее процессы с позитронами и другие релятивистские эффекты. Важность этих расчетов была не столько в том, что получился более аккуратный результат, а в том, что была решена проблема бесконечностей; оказалось, что все бесконечности благополучно сокращаются без всякого произвольного отбрасывания вкладов виртуальных фотонов высоких энергий.

Как говорил Ницше, «все то, что нас не убивает, делает нас сильнее»¹⁸⁷¹. Проблемы бесконечностей почти загубили квантовую электродинамику, но затем она была спасена благодаря идее сокращения бесконечностей с помощью переопределения или *перенорми-*

³⁾ Чуть более точно, включение процесса с позитроном приводит к тому, что сумма по энергиям ведет себя как сумма ряда $1 + 1/2 + 1/3 + \dots$, а не как сумма $1+2 + 3 + 4 + \dots$. Обе суммы бесконечны, но одна чуть в меньшей степени, чем другая, в том смысле, что требуется меньше усилий понять, что с ней делать.

91

ровки массы и заряда электрона. Однако для того, чтобы можно было решить проблему бесконечностей указанным способом, необходимо, чтобы они возникали в процессе вычислений в небольшом числе строго определенных случаев, соответствующих ограниченному классу специальных простых квантовых теорий поля. Такие теории называются *перенормируемыми*. Простейшая версия квантовой электродинамики перенормируема в указанном смысле, однако любое малейшее изменение разрушает это свойство и приводит к такому варианту теории, когда бесконечности не могут быть сокращены путем переопределения констант. Таким образом, квантовая электродинамика не только математически удовлетворительна и согласуется с экспериментом, но и содержит в самой себе объяснение своей структуры: любое небольшое изменение в теории приводит не только к расхождению с опытом, но к вообще абсурдным результатам — бесконечным значениям экспериментально хорошо определенных величин.

Проделанные в 1948 г. вычисления лэмбовского сдвига были ужасно сложными. Дело в том, что хотя вычисления и включали позитроны, но сам сдвиг представлялся в виде суммы слагаемых, каждое из которых нарушало требования специальной теории относительности, так что только окончательный ответ был с ней совместим. Тем временем Ричард Фейнман, Джулиан Швингер и Синитиро Томонага независимо разработали намного более простые методы вычислений, на каждом шаге совместимых с теорией относительности. Новая техника была использована для других вычислений, многие из которых оказались во впечатляющем согласии с опытом. Например, электрон создает в окружающем пространстве крохотное по величине магнитное поле. Это поле было первоначально вычислено в 1928 г. Дираком с помощью созданной им релятивистской квантовой теории электрона. Сразу же после конференции в Шелтер Айленде Швингер опубликовал результаты приближенных вычислений изменения величины напряженности магнитного поля электрона, связанного с процессами испускания и обратного поглощения виртуальных фотонов. С тех пор это вычисление неоднократно уточнялось⁸⁸. Современный результат состоит в том, что за счет процессов испускания и последующего поглощения фотонов и ряда других процессов магнитное поле электрона увеличивается в 1,00115965214 раз по сравнению со старым предсказанием Дирака, не учитывающим эти процессы (ошибка приведенного значения равна ± 3 в последнем знаке). Как раз в то время, когда Швингер сделал свои вычисления, группа И. Раби в Колумбийском университете экспериментально установила, что магнитное поле электрона на самом деле несколько больше старого дираковского значения, причем на величину, предсказанную Швингером. Последний экспериментальный результат таков: магнитное поле электрона больше дираковского значения в 1,001159652188 раз (ошибка ± 4 в послед-

92

нем знаке). Такое количественное согласие теории и эксперимента является, вероятно, самым впечатляющим во всей современной науке. Неудивительно, что после таких успехов квантовая электродинамика в ее простейшей перенормируемой версии стала восприниматься как правильная теория фотонов и электронов. И все же, несмотря на экспериментальные подтверждения теории и даже несмотря на то, что все бесконечности в ней сокращались, если только правильно с ними обращаться, тот факт, что эти бесконечности вообще возникают, вызывал непрестанное ворчание по поводу применимости квантовой электродинамики и подобных теорий. В частности, Дирак всегда сравнивал процедуру перенормировки с заметанием мусора под ковер. Я не соглашался с Дираком и вел с ним дискуссии на конференциях в Корал Гейбл и Лейк Констанс. Учет разницы между голыми массой и зарядом и их измеряемыми значениями — это не просто трюк, позволяющий избавиться от бесконечностей. Подобную процедуру мы обязаны совершать и тогда, когда все величины конечны. Здесь нет ничего произвольного, берущегося с потолка, это просто вопрос корректного определения того, что же мы в действительности измеряем в лаборатории, когда пытаемся определить на опыте массу и заряд электрона. Я не видел ничего ужасного в бесконечных значениях голых массы и заряда⁸⁹, если только окончательные результаты для физических величин оказываются конечными и однозначными, да еще и согласующимися с опытом. Мне казалось, что столь успешная теория, как квантовая электродинамика, должна быть более или менее правильной, хотя, возможно, и сформулированной не самым лучшим образом. Дирак оставался непоколебимым. Я до сих пор не согласен с его отношением к квантовой электродинамике, хотя не думаю, что он был просто упрямым, требование, чтобы теория была полностью конечной,

аналогично множеству других эстетических требований, которые всегда выдвигаются физиками-теоретиками.

* * *

Мой третий рассказ посвящен развитию и окончательному признанию современной теории слабых ядерных сил. В повседневной жизни эти силы не так важны, как электрические, магнитные или гравитационные, но они играют существенную роль в цепочке ядерных реакций, за счет которых в сердцевинах звезд выделяется энергия и происходит образование различных химических элементов.

Впервые слабые ядерные силы обнаружили в явлении радиоактивности, открытом в 1896 г. Анри Беккерелем. В 1930-е гг. стало понятно, что в том конкретном типе радиоактивности, который обнаружил Беккерель, а именно в бета-распаде ядер, слабая ядерная сила заставляет нейтрон внутри ядра превращаться в протон, одновременно образуя электрон и еще одну частицу, известную сейчас как

93

антинейтрино, которые вылетают из ядра. Подобный процесс не может происходить за счет сил других типов. Сильная ядерная сила, удерживающая протоны и нейтроны вместе внутри ядра, и электромагнитная сила, отталкивающая протоны внутри ядра друг от друга, не способны изменить тип этих частиц. Тем более это не может сделать гравитационная сила. Таким образом, наблюдение превращения нейтронов в протоны или протонов в нейтроны свидетельствует о новом типе сил в природе. Как следует из названия, слабые ядерные силы много слабее электромагнитных сил или сильных ядерных сил. Это вытекает, в частности, из того, что ядерный бета-распад происходит очень медленно — самые быстрые из этих распадов происходят в среднем за одну сотую долю секунды, что невероятно медленно по сравнению с типичной длительностью процессов, вызванных сильными ядерными силами, составляющей величину порядка 10^{-23} с.

В 1933 г. Энрико Ферми сделал первый важный шаг по пути построения теории этой новой силы. В предложенной Ферми теории слабая ядерная сила не действует на расстоянии, как гравитационная или электромагнитная силы, а превращает нейтрон в протон, одновременно создавая в той же точке пространства электрон и антинейтрино. Последовало четверть века усилий экспериментаторов, потраченных на то, чтобы связать концы с концами в теории Ферми. Главным невыясненным вопросом был вопрос о том, как слабая сила зависит от относительной ориентации спинов частиц, участвующих в процессе. В 1957 г. это было наконец установлено, и теория Ферми приняла окончательный вид!⁹⁰

После решительного прорыва, совершенного в 1957 г., казалось, уже не осталось никаких проблем в нашем понимании слабой ядерной силы. И все же, хотя мы имели теорию, способную дать численный ответ для любого наблюдаемого на опыте явления, связанного со слабой силой, сама теория казалась физикам в высшей степени неудовлетворительной. Многие из нас в тяжких трудах пытались улучшить теорию и придать ей смысл.

Недостатки теории Ферми были связаны не с экспериментом, а с самой теорией. Прежде всего, хотя теория хорошо описывала ядерный бета-распад, она приводила к бессмысленным результатам для более экзотических процессов. Теоретики пытались задавать совершенно осмысленные вопросы, например, какова вероятность рассеяния нейтрино при столкновении с электроном. Когда же они пытались вычислить эту вероятность (принимая во внимание испускание и последующее поглощение нейтрона и антипротона), ответ оказывался бесконечным. Как вы понимаете, сами подобные эксперименты еще не были проделаны, но вычисления давали такие результаты, которые никогда не могли бы быть согласованы с каким бы то ни было опытом. Как мы уже видели, в 1930-е гг. подобные бесконечности были обнаружены Оппенгеймером и другими

94

в теории электромагнитных сил, но в конце 1940-х гг. теоретики обнаружили, что все эти бесконечности в квантовой электродинамике сокращаются при правильном определении или «перенормировке» массы и заряда электрона. Чем больше физики узнавали о свойствах слабых сил, тем яснее становилось, что бесконечности в теории Ферми подобным образом не сокращаются — теория была перенормируемой.

Но была и другая трудность в теории слабых сил — она содержала слишком много произвольных параметров. Существенные характеристики слабой силы более или менее непосредственно извлекались из эксперимента и могли варьироваться в широких пределах без нарушения каких-либо известных физических принципов.

В течение долгого времени, начиная со старших курсов университета, я так и сяк пытался работать над теорией слабых сил, но в 1967 г. меня увлекли проблемы сильных ядерных сил, удерживающих протоны и нейтроны внутри атомных ядер. Я пытался развить теорию сильного взаимодействия по аналогии с квантовой электродинамикой⁹¹. Мне казалось, что различие между сильными ядерными силами и электромагнетизмом можно объяснить с помощью явления, известного под названием *нарушение симметрии* (ниже я объясню, что это такое). Моя идея не сработала. Силы сильного взаимодействия в развитой мной теории были совершенно не похожи на те, которые известны нам из опыта. Но затем внезапно до меня дошло, что идеи, оказавшиеся совершенно непригодными для объяснения сильных взаимодействий, дают математическую основу теории слабой ядерной силы, содержащую все, что только можно пожелать. Я увидел возможность построения теории слабой силы, аналогичной квантовой электродинамике. Точно так же, как электромагнитная сила между зарядами, находящимися на расстоянии друг от друга, обусловлена обменом фотонами, так и слабая сила проявляет свое действие не в какой-то одной точке пространства (как в теории Ферми), а порождается обменом фотоподобными частицами между частицами материи, находящимися в разных точках. Эти новые фотоподобные частицы не могут быть безмассовыми как фотоны (один из аргументов заключается в том, если бы они были безмассовыми, их бы давно обнаружили), но они вводятся в теорию способом, настолько похожим на тот, благодаря которому в квантовой электродинамике возникают фотоны, что я подумал: а не будет ли такая теория перенормируемой в том же смысле, что и квантовая электродинамика, т. е. не сократятся ли все бесконечности за счет переопределения масс и других параметров теории. Кроме того, вид теории сильно зависел от положенных в основу принципов, поэтому можно было в значительной степени избежать того произвола, который существовал в предыдущих теориях.

95

Мне удалось построить конкретный вариант подобной теории, т. е. написать определенную систему уравнений, определяющих закон взаимодействия частиц друг с другом и сводящихся в приближении малых энергий к теории Ферми. Хотя вначале у меня и в мыслях не было ничего подобного, но в процессе работы я обнаружил, что построенная мной теория

оказалась не просто теорией слабой силы, развитой на базе аналогии с электромагнетизмом; эта теория оказалась единой теорией электромагнитных и слабых сил, которые, как выяснилось, суть две разные ипостаси одной и той же силы, которую сейчас принято называть *электрослабой* силой. Фундаментальная частица фотон, испускание и поглощение которого порождает электромагнитные силы, оказался тесными узлами связан в одно семейство с другими фотоподобными частицами, существование которых предсказывала теория: электрически заряженными частицами *W*, обмен которыми порождает силы, ответственные за бета-радиоактивность, и нейтральной частицей *Z*, о которой я расскажу чуть ниже. (Частицы *W* давно фигурировали в разных теориях, пытавшихся объяснить слабые силы; само обозначение *W* происходит от слова *weak* — слабый. Я выбрал для обозначения нейтральной частицы букву *Z*, так как эта частица имеет нулевой *{zero}* электрический заряд, и, кроме того, потому что *Z* — последняя буква в английском алфавите, а я надеялся, что эта частица будет последней в семействе). По существу, такую же теорию независимо построил в 1968 г. пакистанский физик Абдус Салам, работавший тогда в Триесте. Некоторые аспекты этой теории рассматривались в работе Салама и Джона Уорда и еще раньше в работе моего товарища по колледжу и Корнеллскому университету Шелдона Глэшоу.

Таким образом, похоже, удалось объединить слабые и электромагнитные силы. Любому хочется объяснить все больше и больше вещей с помощью все меньшего числа идей, хотя, повторю еще раз, я совершенно не понимал, куда идет дело, когда начинал свои исследования. Но при всем при этом в 1967 г. предложенная теория не давала никаких объяснений ни одной экспериментальной аномалии в физике слабых сил. Не существовало экспериментальной информации, которую могла бы объяснить эта теория, и которая ранее не была бы объяснена в рамках теории Ферми. Поэтому сначала новая теория электрослабых сил не вызвала никакого интереса. Но я не думаю, что теория не заинтересовала других физиков только потому, что не имела экспериментальной поддержки. Не менее важным был чисто теоретический вопрос о внутренней согласованности теории.

И Салам, и я высказали убеждение, что теория устранил проблемы бесконечностей при расчете процессов, обусловленных слабыми силами. Но у нас не хватило сообразительности это доказать. В 1971 г. я получил препринт работы молодого студента-старшекурс-

96

ника Утрехтского университета по имени Герард 'т Хоффт, в которой он утверждал, что наша теория действительно разрешила проблемы бесконечностей: при вычислении наблюдаемых величин эти бесконечности действительно сокращали друг друга, в точности так же, как в квантовой электродинамике.

Сначала работа 'т Хоффта меня не убедила. Я никогда не слышал о нем, а разработанный Фейнманом математический прием, использованный в работе, незадолго до этого был мною подвергнут сомнению. Вскоре, однако, я услышал, что теоретик Бен Ли серьезно отнесся к идеям 'т Хоффта и попытался получить те же результаты, используя более привычные математические методы. Я знал Бена Ли и очень его уважал — раз уж он счел, что в работе 'т Хоффта что-то есть, я не должен ею пренебрегать. (Позднее Бен стал моим лучшим другом и сотрудником. Он трагически погиб в автомобильной катастрофе в 1977 г.) Более внимательно посмотрев на то, что сделал 'т Хоффт, я убедился, что он действительно нашел ключ к доказательству сокращения всех бесконечностей.

Хотя все еще не существовало ни малейших экспериментальных свидетельств в пользу электрослабой теории, но именно после работы 'т Хоффта она стала частью рабочего аппарата физики. Это как раз тот случай, когда можно с достаточной точностью описать уровень интереса к научной теории. Так случилось, что Институт научной информации опубликовал данные по количеству цитирований моей первой работы по электрослабой теории, как пример того, насколько анализ цитирований может быть полезен при изучении истории науки. Моя статья была опубликована в 1967 г. В том году количество ссылок на нее равнялось нулю⁹². В период 1968—1969 гг. количество ссылок опять равнялось нулю. (В это время и Салам, и я пытались доказать то, что в конце концов удалось 'т Хофту т. е. что теория свободна от бесконечностей.) В 1970 г. на работу сослались один раз. (Я не знаю, кто это сделал.) В 1971 г., т. е. в том году, когда была сделана работа 'т Хоффта, появилось три ссылки, одна из которых принадлежала 'т Хофту. В 1972 г., все еще не имея никакой поддержки со стороны эксперимента, работа внезапно получила 65 ссылок. В 1973 г. число ссылок составило 165, затем это число постепенно возрастало, пока в 1980 г. не составило 330 ссылок. Недавнее исследование того же института показало, что моя работа оказалась самой цитируемой работой по физике элементарных частиц за все предыдущие пятьдесят лет⁹³.

Открытие, из-за которого физики с самого начала проявили интерес к этой теории, состояло в том, что она решает внутреннюю концептуальную проблему физики частиц — проблему бесконечностей в теории слабых ядерных сил. Ни в 1971, ни в 1972 г. не было ни малейших экспериментальных свидетельств, что эта теория лучше старой теории Ферми.

97

Затем начали накапливаться и экспериментальные подтверждения. Обмен частицей *Z* должен был породить новый тип слабых ядерных сил, получивших название *слабых нейтральных токов*, которые должны были проявиться при рассеянии пучков нейтрино на ядрах обычных атомов. (Термин «нейтральный ток» используется потому, что в этих процессах не происходит обмена электрическим зарядом между ядром и другими частицами.) Эксперименты по обнаружению таких процессов рассеяния нейтрино были подготовлены в ЦЕРНе (Европейский центр ядерных исследований) и в лаборатории им. Ферми (Фермилабе) под Чикаго. Требовались значительные финансовые вложения. Каждый эксперимент требовал для своего осуществления труда тридцати—сорока физиков. Подобные опыты не делаются так запросто, если у вас нет ясного понимания того, что вы собираетесь обнаружить. В 1973 г. в ЦЕРНе объявили об открытии слабых нейтральных токов. Вскоре об этом же объявили в Фермилабе. После 1974 г., когда в Фермилабе и ЦЕРНе пришли к согласию относительно результатов экспериментов, научное сообщество пришло к убеждению в справедливости электрослабой теории. Шведская газета *Дагенс Нюхетер* даже объявила в 1975 г., что Салам и я должны получить в этом году Нобелевскую премию по физике (на самом деле этого не случилось).

Кто-то может спросить, почему признание электрослабой теории было столь быстрым и всеобъемлющим. Конечно, сыграло роль то, что слабые нейтральные токи были предсказаны и затем обнаружены. Разве не это есть тот способ, с помощью которого и устанавливается справедливость какой-то теории? Думаю, что все не так просто.

Прежде всего, нейтральные токи не были чем-то совершенно новым для теории слабых сил. Как-то мне удалось проследить развитие идеи нейтральных токов назад во времени до статьи Георгия Гамова и Эдварда Теллера, которые с

помощью вполне разумных доводов предсказали в 1937 г. существование слабых нейтральных токов. Более того, еще в 1960-е гг. имелись экспериментальные свидетельства нейтральных токов, но в них никто не верил: сами экспериментаторы, обнаружившие эти свидетельства, всегда относились к ним, как к «фону». То новое, что появилось в 1973 г. и было очень важно для экспериментаторов, это предсказание, что значения интенсивности нейтральных токов находятся в определенном интервале. Например, в одном типе нейтральных реакций вклад нейтральных токов мог составлять от 15 до 25% от вклада обычных слабых сил. Такое предсказание позволяло определить чувствительность, необходимую при экспериментальном поиске таких сил. И все же перелом, произошедший в 1973 г., был связан с тем, что теория приобрела несомненные черты внутренней согласованности и жесткости. Это заставило физиков признать, что прогресс в их собственной научной работе связан

98

с признанием правильности теории, а не в ожидании того, что из всего этого получится.

В определенном смысле электрослабая теория получила экспериментальную поддержку до открытия нейтральных токов, так как она правильно воспроизвела все свойства слабых сил, ранее объясненные теорией Ферми, равно как и все свойства электромагнитных сил, которые успешно описывала квантовая электродинамика. Здесь вновь, как и в случае с общей теорией относительности, можно спросить, почему воспроизведение результатов, уже полученных более ранними теориями, рассматривается как успех? Теория Ферми объяснила свойства слабых сил с помощью некоторого числа произвольных гипотез, произвольных в том же смысле, что и закон обратных квадратов для ньютоновской теории тяготения. Электрослабая теория объяснила эти гипотезы (например, зависимость слабых сил от спинов участвующих во взаимодействии частиц) значительно более неотразимым образом. Но в такого рода оценках невозможно быть точным: это дело вкуса и опыта.

Неожиданно в 1976 г., через три года после открытия нейтральных токов, возник кризис. Уже не было никаких сомнений относительно существования нейтральных токов, но эксперименты, сделанные в 1976 г., указывали, что некоторые их свойства не соответствуют предсказаниям теории. Отклонения проявились в экспериментах, выполненных независимо в Сиэттле и Оксфорде и связанных с изучением распространения поляризованного света сквозь пары висмута. Еще со времени работы Жана-Батиста Био в 1815 г. было известно, что поляризованный свет, проходя через растворы некоторых сахаров, испытывает вращение плоскости поляризации либо в правую, либо в левую сторону. Например, при прохождении через раствор обычного сахара глюкозы-R, плоскость поляризации света поворачивается направо, а при прохождении через раствор глюкозы-L — налево. Происходит это потому, что молекула глюкозы-R не совпадает со своим зеркальным отражением, молекулой глюкозы-L, точно так же, как перчатка на левую руку отличается от перчатки на правую руку (в то же время шляпа или галстук и их зеркальные отражения выглядят одинаково). Казалось бы, при прохождении поляризованного света через газ, состоящий из отдельных атомов веществ типа висмута, не должно происходить такого вращения плоскости поляризации. Однако электрослабая теория предсказывает асимметрию между правым и левым в слабых взаимодействиях электронов с атомными ядрами, обусловленных обменом Z -частицей, что придает таким атомам свойства, похожие на свойства перчатки или молекулы сахара при отражении в зеркале. (Ожидалось, что эффект будет особенно велик для атомов висмута из-за специфики строения их энергетических уровней.) Расчеты показывали, что лево-правая асимметрия в атоме висмута должна приводить к медленному вращению плоскости поляризации прохо-

99

дящего через пары висмута света в левую сторону. К своему удивлению, экспериментаторы в Оксфорде и Сиэттле не смогли обнаружить такое вращение и сообщили, что если оно и существует, то скорость вращения должна быть намного меньше, чем предсказывает теория.

Это поистине напоминало взрыв бомбы. Казалось, что эксперименты свидетельствовали, что та конкретная версия теории, которую независимо разработали в 1967—1968 гг. Салам и я, оказалась неверной в деталях. Но я не был готов отказаться от общих идей электрослабой теории. Еще начиная с появления работы 'т Хофта в 1971 г., я был совершенно убежден в правильности основных положений теории, а ту версию, которую построили Салам и я, рассматривал как одну из конкретных простых реализаций. Например, могли быть и другие члены в семействе частиц, образованном фотоном и частицами W и Z , или другие частицы, связанные с электроном и нейтрино. Еще задолго до этой истории Пьер Дюгем и У. ван Куин отмечали, что никакая научная теория не может быть полностью отвергнута сравнением с экспериментальными данными, так как всегда есть возможность таких манипуляций с теорией или введения дополнительных предположений, которые приведут к согласию теории и эксперимента. Просто в какой-то момент исследователь должен решить, не являются ли те дополнения, которые необходимо ввести, чтобы избежать конфликта с опытом, слишком уродливыми, чтобы в них можно было поверить.

Действительно, после экспериментов в Сиэттле и Оксфорде многие теоретики стали пытаться придумать небольшие модификации электрослабой теории, которые объясняли бы, почему силы, порождаемые нейтральными токами, не приводят к ожидаемой величине асимметрии между правым и левым. Поначалу мы думали, что можно чуть-чуть изуродовать теорию, но при этом добиться согласия со всеми имеющимися данными. Вспоминаю, что как раз в это время Бен Ли прилетел в Пало Альто, где я тогда работал, и я отменил давно запланированную поездку в Йосемиту, чтобы поработать с ним и попытаться модифицировать электрослабую теорию таким образом, чтобы удовлетворить всем экспериментальным данным (в том числе и снять некоторые разногласия между теорией в данными по реакциям с нейтрино высоких энергий). Но ничто, похоже, не помогало.

Одна из проблем заключалась в том, что к этому времени уже имелось большое количество данных, полученных в ЦЕРНе и Фермилабе, относительно рассеяния нейтрино при соударении с протонами и нейтронами, причем практически все они подтверждали первоначальную версию электрослабой теории. Было очень трудно понять, каким образом какая-то другая теория могла бы так же естественно согласовываться с этими данными, заодно согласуясь и с данными по висмуту, т. е. как можно было избежать сильных усложнений, специально подогнанных так, чтобы согласовать теорию с данными всех

100

экспериментов. Чуть позже в Гарварде Говард Джорджи и я высказали общие аргументы в пользу того, что не существует естественного способа так изменить электрослабую теорию, чтобы она согласовывалась и с данными Оксфорда и

Сиэттла, и с более ранними данными по нейтринным реакциям. Конечно, это не остановило некоторых теоретиков от попыток построить весьма неестественные теории (такую деятельность в бостонских научных кругах называли половым извращением), что соответствовало древнейшему закону прогресса в науке, согласно которому лучше делать что-нибудь, чем ничего не делать.

Затем в 1978 г. в Стэнфорде был проделан новый эксперимент, в котором слабая сила между электроном и атомным ядром измерялась совершенно иначе, используя не электроны в атомах висмута, а рассеивание пучка электронов больших энергий, полученных на Стэнфордском ускорителе на ядрах дейтерия. (Выбор дейтерия в качестве мишени был вызван не какими-то особыми причинами, а просто тем, что это удобный источник и протонов, и нейтронов.) Теперь уже экспериментаторы обнаружили ожидаемую асимметрию между правым и левым. В этом опыте асимметрия проявлялась в разнице скорости рассеяния электронов, вращающихся направо и налево. (Мы говорим, что движущаяся частица вращается направо или налево, если сжатые в кулак пальцы на, соответственно, правой или на левой руке показывают направление вращения, в то время как большой палец направлен в сторону движения частицы.) Измеренная относительная разница в скоростях рассеяния составляла одну десятитысячную, что как раз совпадало с предсказанием теории.

Внезапно физики, занимающиеся частицами, во всем мире пришли к выводу, что первоначальная версия электрослабой теории, несмотря ни на что, верна. Но заметьте, что все еще были два экспериментальных результата, которые противоречили предсказаниям теории относительно величины слабого взаимодействия нейтральных токов между электроном и ядром, и лишь один эксперимент, подтверждавший эти предсказания, правда в несколько ином контексте. Почему же тогда, как только появился эксперимент, подтверждавший электрослабую теорию, все физики согласились с тем, что теория должна быть верна? Безусловно, одна из причин заключалась в том, что мы все были убеждены, что не хотим иметь дело с любой неестественной версией первоначальной электрослабой теории. Эстетический критерий естественности был использован для того, чтобы помочь физикам оценить значимость противоречащих друг другу экспериментальных данных.

Экспериментальная проверка электрослабой теории продолжалась. Эксперимент в Стэнфорде не был повторен, но несколько научных групп физиков-атомщиков занялись поиском лево-правой асимметрии не только у висмута, но и у других атомов вроде таллия и цезия. (Еще до стэнфордского эксперимента группа физиков

101

из Новосибирска сообщила о наблюдении ожидавшейся асимметрии в висмуте, но, к сожалению, мало кто обратил внимание на это сообщение до появления результатов в Стэнфорде, отчасти из-за не очень высокой репутации на Западе советских физиков в отношении точности экспериментов.) Были проделаны новые эксперименты в Беркли и Париже, физики Сиэттла и Оксфорда повторили свои опыты⁹⁴. Сейчас существует полное согласие между всеми экспериментаторами, как и между теоретиками, что предсказываемая лево-правая асимметрия действительно имеет место как в атомах, так и при рассеянии электронов больших энергий на Стэнфордском ускорителе, причем величина эффекта соответствует ожидаемой. Но наиболее впечатляющим тестом электрослабой теории безусловно были опыты группы в ЦЕРНе, возглавлявшейся Карло Руббиа. В 1983 г. они открыли частицы *W*, а в 1984 г. — частицы *Z*, т. е. те частицы, существование и свойства которых были правильно предсказаны электрослабой теорией в ее первоначальной версии.

Оглядываясь назад на эти события, я испытываю некоторое разочарование, что потратил столько времени, пытаясь заставить электрослабую теорию согласовываться с данными Оксфорда и Сиэттла. В 1977 г. надо было мне поехать в Иосемиту, как я и собирался; кстати, я так там и не побывал до сих пор. Вся эта история хорошо иллюстрирует полужутливое замечание, приписываемое Эддингтону: не следует верить ни одному экспериментальному результату, пока он не подтвержден теорией.

Я совсем не хочу создавать у читателей впечатления, что эксперимент и теория всегда влияют друг на друга именно так, и что таким способом достигается прогресс в науке. Подчеркивая важность теории, я хочу лишь возразить широко распространенной точке зрения, которая кажется мне чрезмерно эмпирической. На самом деле можно вспомнить историю важнейших экспериментов в физике и обнаружить, что их роль была очень разной, точно так же, как очень по-разному взаимодействовали эксперимент и теория. Похоже, что любое ваше высказывание о том, как *могут* взаимодействовать теория и эксперимент, окажется правильным, а любое утверждение о том, как они *должны* взаимодействовать, будет, скорее всего, неверным.

Поиск сил, порождаемых нейтральными слабыми токами, в ЦЕРНе и Фермилабе есть пример определенного типа экспериментов, осуществляемых с целью проверки пока что не общепринятых теоретических идей. Иногда такие эксперименты подтверждают, а иногда и опровергают идеи теоретиков. Несколько лет тому назад Фрэнк Вильчек и я независимо предсказали существование частицы нового типа⁹⁵. Мы согласились назвать эту частицу *аксион*, понятия не имея о том, что так же называется сорт стирального порошка. Экспериментаторы стали искать аксион и не нашли, по крайней мере с теми свойствами, которые мы предсказывали. Идея либо неправильна, ли-

102

бо нуждается в модификации⁹⁶. Однажды я получил сообщение от группы физиков, собравшихся на конференции в Аспене, гласившее: «*Мы его нашли!*», но это послание было прикреплено к коробке со стиральным порошком.

Но бывают и эксперименты, результаты которых являются для всех полной неожиданностью, которую не предвидел ни один теоретик. К этой категории относятся опыты, в которых были обнаружены рентгеновские лучи, так называемые странные частицы, или, в конце концов, наблюдение аномальной прецессии орбиты Меркурия. Думаю, что именно эти эксперименты наполняют радость сердца экспериментаторов и журналистов.

Но также есть и эксперименты, являющиеся для нас *почти* полной неожиданностью, — в них обнаруживаются эффекты, обсуждавшиеся как одна из возможностей, но только как логическая возможность, для реализации которой нет убедительных причин. Сюда относятся эксперименты, обнаружившие нарушение так называемой симметрии по отношению к обращению времени, и эксперименты, обнаружившие некоторые новые частицы вроде *b*-кварка или похожего на очень тяжелый электрон тау-лептона.

Еще один интересный класс экспериментов — это опыты, в которых обнаруживаются эффекты, предсказанные

теоретиками, но само открытие этих эффектов происходит тем не менее совершенно случайно, так как экспериментаторы ничего не знали о предсказании либо потому, что у теоретиков не хватало веры в свою теорию, чтобы разрекламировать ее перед экспериментаторами, либо потому, что каналы научной информации слишком забиты шумом. Среди таких экспериментов — открытие универсального фона радиоизлучения⁹⁷, оставшегося от Большого взрыва, и открытие позитрона.

Затем есть эксперименты, которые проводят, даже зная результат, даже несмотря на то, что теоретические предсказания так прочны, что в теории никто серьезно не сомневается. Проводятся такие эксперименты потому что сами явления настолько привлекательны и сулят столько возможностей дальнейших экспериментов, что ученые просто обязаны идти вперед и изучать эти вещи. В эту категорию я бы включил открытие антипротона и нейтрино и сравнительно недавнее открытие частиц *W* и *Z*. Сюда же относятся поиски разных экзотических эффектов, предсказываемых общей теорией относительности, вроде гравитационного излучения.

Наконец, можно вообразить категорию экспериментов, которые *опровергают* давно принятые теории, ставшие частью стандартного физического мировоззрения. *Я не могу поместить в эту категорию ни одного опыта за последние сто лет.* Конечно, можно привести примеры, когда выяснялось, что теории имеют более узкую область применимости, чем считалось до этого. Ньютоновская теория движения неприменима при больших скоростях. Четность, симметрия

103

между правым и левым, нарушается в слабых взаимодействиях. И так далее. Но в XX в. не было такого случая, чтобы теория, принятая мировым физическим сообществом как правильная, вдруг оказывалась просто *ошибкой*, как это в свое время случилось с птолемеевской теорией эпициклов, придуманной для объяснения движения планет, или с теорией, что теплота есть калорическая жидкость. Однако в XX в., как мы видели в случаях общей теории относительности и электрослабой теории, признание физических теорий часто достигалось на основе эстетических суждений, прежде чем появлялись по-настоящему убедительные экспериментальные свидетельства в их пользу. В этом я вижу проявление необычайной мощи чувства прекрасного, свойственного физикам, которое подкрепляет, а иногда даже перевешивает экспериментальные свидетельства.

Судя по тому, что я рассказал, читатель может прийти к выводу, что прогресс в научных открытиях и подтверждение теорий — очень запутанное дело. В связи с этим есть хорошая параллель между военной историей и историей науки. В обоих случаях комментаторы пытаются найти систематические законы того, как максимизировать чьи-то шансы на успех, неважно, идет ли речь о войне или о науке. Возможно, это происходит, потому что в военной истории и истории науки в значительно большей степени, чем в политической, экономической или культурной истории, ясна граница между победой и поражением. Можно бесконечно спорить о причинах и последствиях Гражданской войны в Америке, но нет ни малейших сомнений в том, что при Геттисберге армия Мида разбила армию Ли. Точно так же нет сомнений в том, что точка зрения Коперника на устройство Солнечной системы лучше, чем точка зрения Птолемея, а взгляды Дарвина на эволюцию лучше взглядов Ламарка.

Даже не пытаясь сформулировать, что значит наука войны, военные историки часто пишут о генералах так, будто они проигрывали битвы, потому что не следовали каким-то хорошо известным правилам военной науки⁹⁸. Например, довольно широко распространено пренебрежительное отношение к двум генералам армии конфедератов в Гражданской войне — Джорджу Макклеллану и Амброзу Бернсайду. Макклеллана обвиняют в том, что он не хотел идти на столкновение с вражеской армией Ли в Северной Вирджинии. Бернсайда, в свою очередь, ругают за то, что он ни в грош не ставил жизни своих солдат, безуспешно пытаясь атаковать хорошо укрепленные позиции врага под Фредериксбургом. От внимания читателя не ускользнет, что Макклеллана критикуют за то, что он не действовал как Бернсайд, а Бернсайда — за то, что он не действовал, как Макклеллан. И тот и другой были глубоко бездарными генералами, но не потому, что они не сумели выполнить установленные правила военной науки.

104

На самом деле лучшие военные историки давно отметили трудности в установлении правил поведения генералов. Речь идет не о военной науке, а скорее о характере военного поведения, которому нельзя научить и которое трудно сформулировать, но которое где-то и когда-то помогает выигрывать битвы. Это называется словами *искусство войны*⁹⁹. Точно так же я полагаю, что не надо возлагать надежды на науку о науке, на формулировку определенных правил того, как ведут себя или должны вести себя ученые. Я стремлюсь лишь к описанию того типа поведения, который исторически приводил к научному прогрессу. Я рассказываю об искусстве науки.

ГЛАВА VI. Красивые теории

*Спеша за облачком или цветком,
 Душа приют недолгий обретает,
 Пред ней в сиянии неба голубом
 Тень вечности, мелькая, исчезает.*

Генри Воон. Приют

В 1974 г. Поль Дирак приехал в Гарвард, чтобы рассказать о своей исторической работе, ставшей одной из основ современной квантовой электродинамики. В конце своего выступления Дирак обратился к старшекурсникам и посоветовал им больше думать о красоте тех уравнений, которые они исследуют, а не об их смысле. Это был не самый лучший совет для студентов, но поиск красоты в физике¹⁰⁰ красной нитью проходит через все работы Дирака, да и вообще составляет важную страницу истории физики.

Небольшой разговор о важности красоты в науке не должен рассматриваться как пустая болтовня. Я совсем не собираюсь использовать эту главу для очередных словоизвержений по поводу красоты вообще. Моя цель — более подробно рассмотреть происхождение красоты физических теорий или вопрос о том, почему наше чувство прекрасного иногда оказывается полезным, а иногда изменяет нам и почему плодотворное использование этого чувства есть знак нашего продвижения к окончательной теории.

Физик, заявляющий, что теория красива, имеет в виду не совсем то, что подразумевается, когда говорят, что красива какая-то картина, музыкальное произведение или стихотворение. Это утверждение не является просто личным выражением полученного эстетического наслаждения, скорее, это ближе к тому, что имеет в виду тренер лошадей, когда он глядит на скаковую лошадь и говорит, что она красива. Конечно, тренер выражает свое личное мнение, но это есть мнение по поводу объективного факта: основываясь на суждениях, которые тренеру иногда трудно выразить словами, он утверждает, что эта лошадь относится к породе тех, которые выигрывают скачки.

106

Конечно, разные тренеры могут по-разному оценивать качества лошадей. Именно на этом и держатся лошадиные скачки. Но эстетическое чувство тренеров есть средство для объективного вывода — отбора лошадей для участия в скачках. Предполагается, что чувство прекрасного у физиков служит аналогичной цели — оно помогает отобрать идеи, позволяющие объяснить устройство природы. Физики, как и тренеры лошадей, могут быть правы или ошибаться в своих суждениях, но они не просто забавляются этой игрой. Конечно, часто бывает и такое, но все же это не единственная цель их эстетических суждений.

Такое сравнение вызывает больше вопросов, чем дает ответов. Во-первых, *что такое* красивая теория? Каковы те характеристики физических теорий, которые вызывают у нас ощущение красоты? Более трудный вопрос: почему срабатывает ощущение красоты у физиков? Истории, рассказанные в предыдущей главе, продемонстрировали, что такое личное и субъективное чувство, как наше ощущение красоты, помогает не только развивать физические теории, но и судить об их справедливости. Почему мы обладаем таким даром эстетической оценки? Попытка ответить на этот вопрос вызывает к жизни еще более трудный вопрос, хотя он, возможно, и звучит тривиально: а чего собственно хотят добиться физики?

Что такое красивая теория? Работник одного большого американского музея однажды очень рассердился на то, что я употребил слово «красота» в разговоре о физике. Он сказал, что профессионалы в его области перестали употреблять это слово, так как поняли, насколько трудно определить его смысл. Очень давно физик и математик Анри Пуанкаре признал: «Очень трудно определить понятие математической красоты, но это же относится и к любому другому типу красоты».

Я не собираюсь пытаться определить, что такое красота, так же как не взялся бы определять понятия любви или страха. Такие вещи не определяются; просто, когда вы их чувствуете, вы знаете, о чем идет речь. Позднее, после того, как эти чувства испытаны, вы можете иногда их как-то описать словами, что я и попытаюсь сделать.

Под красотой физической теории я, безусловно, не имею в виду механическую красоту расположения математических символов на печатном листе. Поэт-метафизик Томас Траерн специально заботился о том, чтобы слова его поэм образовывали на листе бумаги красивый узор¹⁾. Но к физике эти игры не относятся. Я также хотел бы отделить тот тип красоты, который я имею в виду, от качества, которое математики и физики иногда называют элегантностью. Доказательство или вычисление элегантно, если с его помощью достигается мощный результат при минимальном количестве не имеющих отношения

¹⁾ Этим же «балует» более знакомый русскому читателю Андрей Вознесенский. — Прим. перев. \

107

к делу усложнений. Для красивой теории совершенно не обязательно, чтобы ее уравнения имели элегантные решения. Уравнения общей теории относительности невероятно трудно решить за исключением простейших ситуаций, но это ни в коей мере не противоречит красоте самой теории. Эйнштейн говорил, что ученые должны оставить элегантность для портных.

Частью того, что я называю красотой, является простота, но простота идей, а не механическая простота, которую можно оценить, подсчитав число уравнений или символов. Теории тяготения Ньютона и Эйнштейна содержат уравнения, определяющие гравитационные силы, создаваемые любым заданным количеством вещества. В ньютоновской теории таких уравнений три (что соответствует трехмерности нашего пространства), в теории Эйнштейна их четырнадцать¹⁰¹. Само по себе это не может считаться эстетическим преимуществом ньютоновской теории перед эйнштейновской. На самом деле именно теория Эйнштейна более красива, отчасти из-за простоты ее главной идеи об эквивалентности тяготения и инерции. В этом сходятся все ученые и, как мы видели, во многом благодаря такой оценке теория Эйнштейна получила быстрое признание.

Есть и другое качество, кроме простоты, делающее физическую теорию красивой — это ощущение неизбежности, которую нам внушает теория. Слушая музыкальное произведение или читая сонет, вы иногда получаете огромное

эстетическое наслаждение от ощущения, что в этом произведении ничего нельзя изменить, что ни одна нота и ни одно слово не должны быть иными. В «Святом семействе» Рафаэля расположение каждой фигуры совершенно. Может быть, это не самая любимая ваша картина, но когда вы на нее смотрите, у вас не возникает желания, чтобы что-то было написано иначе. Это же частично верно (и никогда не более, чем частично верно) и в отношении общей теории относительности. Если вам известны общие физические принципы, принятые Эйнштейном, вы понимаете, что не существует другой существенно отличающейся теории тяготения, к которой он мог бы прийти. Как писал сам Эйнштейн об общей теории относительности, «главной привлекательной чертой теории является ее логическая полнота. Если хоть один из ее выводов окажется неверным, теорию следует отвергнуть; похоже, что подправить ее, не разрушив всю структуру, невозможно»¹⁰².

Это менее верно для теории Ньютона. Ньютон вполне мог предположить, что гравитационная сила уменьшается обратно пропорционально кубу, а не квадрату расстояния, если бы только это соответствовало требованиям астрономических данных, но Эйнштейн не мог включить в свою теорию закон обратных кубов, не разрушив ее концептуальную основу. Поэтому четырнадцать уравнений Эйнштейна неизбежны и, следовательно, красивы, чего нет в трех уравнениях Ньютона. Думаю, что именно это имел в виду Эйнштейн, когда

108

говорил, что левая часть уравнений тяготения в общей теории относительности, содержащая гравитационное поле, красива и как будто вырезана из мрамора, в то время как правая часть уравнений, описывающая материю, все еще уродлива, будто сделана из обыкновенной деревяшки. Все дело в том, что способ включения гравитационного поля в уравнения Эйнштейна почти неизбежен, но в общей теории относительности нет ничего, что объясняло бы, почему материя входит в уравнения именно в таком, а не ином виде.

То же ощущение неизбежности возникает (опять же, только частично) при рассмотрении современной стандартной модели сильных и электрослабых сил, действующих между элементарными частицами. Одно общее свойство придает общей теории относительности и стандартной модели черты неизбежности и простоты: и та, и другая теории подчиняются *принципам симметрии*.

Принцип симметрии — это просто утверждение, что нечто выглядит одинаково с некоторых разных точек зрения. Из всех подобных симметрий простейшей является приближенная двусторонняя симметрия человеческого лица. Так как две стороны вашего лица мало отличаются, то оно выглядит одинаково, если посмотреть на него непосредственно, или поменять местами левую и правую сторону, как это происходит, когда вы глядите в зеркало. Стандартный прием в кино — дать зрителям внезапно понять, что лицо актера, на которое вы смотрели, на самом деле было видно в зеркале; впечатление было бы испорчено, если бы у людей, как у камбалы, оба глаза были бы на одной стороне лица, причем всегда на одной и той же.

Некоторые вещи обладают более расширенной симметрией, чем человеческое лицо. Куб выглядит одинаково, если смотреть на него с шести разных направлений, попарно взаимно перпендикулярных друг другу, а также, если поменять местами правое и левое. Идеальные кристаллы выглядят одинаково, не только если смотреть на них с разных направлений, но и если перемещаться внутри кристалла в определенных направлениях на заданное расстояние. Сфера выглядит одинаково, если смотреть на нее с любого направления. Пустое пространство выглядит одинаково со всех точек и вдоль всех направлений.

Подобные симметрии интересовали и развлекали художников и ученых в течение многих веков, но в науке эти симметрии не играли особой роли. Мы знаем многое о соли, и тот факт, что соль — это кубический кристалл, выглядящий одинаково с шести различных точек зрения, не относится к числу самых важных ее свойств. Нет сомнений и в том, что двусторонняя симметрия — не самое интересное, что можно сказать о человеческом лице. Те симметрии в природе, которые действительно важны, это симметрии не *вещей*, а *законов*.

Симметрия законов природы — это утверждение, что при определенном изменении точки зрения, с которой наблюдаются естественные явления, обнаруженные при этом законы природы не меняются.

109

Такие симметрии часто называют принципами *инвариантности*. Например, открытые нами законы природы не меняют свою форму при изменении ориентации наших лабораторий; нет разницы в том, измеряем ли мы расстояния по направлению к северу, северо-востоку, вверх или в любом другом направлении. Древним и средневековым философам и ученым это не было очевидно; ведь в повседневной жизни имеется явная разница между направлениями вверх, вниз и по горизонтали. Только после зарождения современной науки в XVII в. стало ясно, что низ отличается от верха или направления к северу только потому, что под нами есть большая масса, Земля, а не потому, что (как думал Аристотель) низ и верх являются естественными вместилищами тяжелых и легких вещей, соответственно. Обратите внимание, что эта симметрия не утверждает, что верх и низ одинаковы; наблюдатели, измеряющие расстояния вниз и вверх от поверхности Земли, по-разному описывают события вроде падения яблока, но при этом обнаруживают одни и те же законы, подобные закону притяжения яблока большой массой Земли.

Законы природы выглядят одинаково, где бы ни находились наши лаборатории; на результатах экспериментов не может сказываться то, где проводятся опыты, — в Техасе, в Швейцарии или на какой-нибудь планете с другой стороны нашей Галактики. Законы природы не меняют своего вида, как бы мы не установили часы: нет никакой разницы, начнем ли мы отсчитывать время от начала первой Олимпиады, от Рождества Христова или от момента рождения Вселенной. Это отнюдь не означает, что с течением времени ничто не меняется, или что Техас это то же самое, что Швейцария. Утверждение заключается в том, что законы, обнаруженные в разные моменты времени и в разных местах, одинаковы. Если бы таких симметрий не было, все научные данные нужно было бы переделывать в каждой новой лаборатории и в каждый момент времени.

Любой принцип симметрии в то же самое время есть и принцип простоты. Если бы законы природы различали направления вверх, вниз или на север, то в уравнения, описывающие эти законы, пришлось бы ввести какие-то дополнения, позволяющие проследить за ориентацией наших лабораторий. Соответственно, сами уравнения стали бы заведомо более сложными. На самом деле даже та система обозначений, которую используют математики и физики, для того чтобы уравнения выглядели как можно проще и компактнее, основана на предположении, что все направления в пространстве эквивалентны.

Эти симметрии необычайно важны в классической физике, но их значение еще больше возрастает в квантовой механике. Рассмотрим, что отличает один электрон от другого? Только его энергия, импульс и спин; если не считать этих свойств, каждый электрон во Вселенной похож на любой другой. Все эти свойства электрона характеризуют то,

110

каким образом его квантово-механическая волновая функция откликается на преобразования симметрии, а именно на изменения установки часов, местоположения или ориентации нашей лаборатории²⁾. Таким образом, вещество теряет свою главенствующую роль в физике: все, что остается, — это принципы симметрии и разные способы преобразования волновых функций под действием преобразований симметрии.

Существуют и менее очевидные преобразования пространства-времени, чем простые трансляции и вращения. Законы природы не меняют своей формы для наблюдателей, движущихся с различными постоянными скоростями: нет разницы, проводим ли мы эксперимент здесь, в Солнечной системе, крутящейся вокруг центра Галактики со скоростью в несколько сотен километров в секунду, или в далекой галактике, удаляющейся от нас со скоростью в десятки тысяч километров в секунду. Этот принцип симметрии часто называют принципом относительности. Широко распространено мнение,

²⁾ Например, частота, с которой осциллирует волновая функция любой системы в состоянии с определенной энергией, равна этой энергии, деленной на мировую константу — постоянную Планка. Такая система выглядит совершенно одинаково для двух наблюдателей, установивших показания своих часов с разницей в одну секунду. Однако, если они оба посмотрят на систему в тот момент, когда часы каждого показывают ровно полдень, обнаружится, что колебания находятся в разных фазах. Так как часы установлены по-разному, наблюдатели на самом деле фиксируют положение системы в разные моменты времени, так что один наблюдатель может, например, видеть горб волны, а другой — впадину. В частности, фаза отличается на число циклов колебаний (или долей цикла) за одну секунду, т. е. на частоту колебаний в циклах за секунду, а следовательно, на энергию, деленную на постоянную Планка. В современной квантовой механике мы *определяем* энергию любой системы как изменение фазы (в циклах или долях цикла) волновой функции этой системы в данный момент времени *по часам*, если сдвинуть установку часов на одну секунду. Постоянная Планка участвует в игре только потому, что энергия исторически измеряется в единицах типа калорий, киловатт-часов или электрон-вольт, принятых задолго до создания квантовой механики. Постоянная Планка является просто переводным множителем между этими более старыми системами единиц и естественной квантово-механической единицей энергии — числом циклов в секунду. Можно показать, что определенная таким образом энергия обладает всеми свойствами, которые мы обычно ассоциируем с этим понятием, в том числе свойством сохранения. Действительно, инвариантность законов природы относительно преобразования симметрии, заключающегося в переустановке наших часов, и дает ответ на вопрос, *почему* существует такая величина, как энергия. Точно так же компонента импульса любой системы в любом заданном направлении определяется как произведение постоянной Планка на изменение фазы волновой функции при сдвиге точки, относительно которой измеряются координаты, на один сантиметр в этом направлении. Величина спина системы относительно любой оси определяется как произведение постоянной Планка на изменение фазы волновой функции при повороте системы отсчета, используемой нами для измерения направлений, на один оборот вокруг этой оси. С такой точки зрения импульс и спин представляют собой то, что они есть, благодаря симметрии законов природы относительно изменений системы отсчета, используемой нами для измерения положений или направлений в пространстве. (Перечисляя свойства электронов, я не включил координату, так как координата и импульс являются сопряженными величинами. Можно описывать состояние электрона, задавая его координату *или* импульс, но не обе величины одновременно.)

111

что он был сформулирован Эйнштейном, однако уже в ньютоновской механике был свой принцип относительности. Разница между ними только в том, как скорость движения наблюдателя влияет на наблюдение положений и моментов времени в обеих теориях. Но Ньютон просто постулировал свой принцип относительности; что же касается Эйнштейна, то он явно сформулировал его так, чтобы он был совместим с тем экспериментальным фактом, что скорость света не зависит от скорости движения наблюдателя. В этом смысле упор на симметрию как на вопрос, относящийся к физике, в работе Эйнштейна 1905 г. по специальной теории относительности ознаменовал начало современного отношения к роли принципов симметрии.

Самое важное отличие ньютоновской физики от эйнштейновской при ответе на вопрос, как движение наблюдателя влияет на наблюдение пространственно-временных положений, заключается в том, что в специальной теории относительности утверждение, что два удаленных друг от друга события произошли одновременно, не имеет абсолютного смысла. Один наблюдатель может видеть, что двое часов одновременно бьют полдень; другой наблюдатель, движущийся относительно первого, обнаруживает, что одни часы пробили полдень раньше или позже других. Как уже отмечалось выше, из-за этого ньютоновская теория гравитации, как впрочем и любая аналогичная теория тяготения, несовместима с специальной теорией относительности. Ньютоновская теория утверждает, что в любой момент времени сила притяжения, действующая со стороны Солнца на Землю, зависит от того, где в этот момент находится Солнце. Возникает вопрос: в этот же момент относительно чего?

Естественный способ исправить положение заключается в отказе от старой ньютоновской идеи о мгновенном действии на расстоянии и замене этой идеи картиной сил, обусловленных *полями*. В такой картине Солнце не притягивает Землю непосредственно; оно создает в окружающем пространстве поле, называемое гравитационным, которое затем оказывает силовое действие на Землю. Может показаться, что такое отличие не составляет большой разницы, но на самом деле разница огромная: когда, например, на поверхности Солнца возникает протуберанец, он сначала оказывает влияние только на гравитационное поле вблизи Солнца, после чего это небольшое изменение поля начинает распространяться в пространстве со скоростью света, как рябь на поверхности воды от брошенного камешка, достигая Земли примерно через восемь минут. Все наблюдатели, движущиеся с любой постоянной скоростью, согласны с таким описанием, так как в специальной теории относительности все наблюдатели измеряют одну и ту же скорость света. Подобным образом электрически заряженное тело создает поле, называемое электромагнитным, действующее посредством электрических и магнитных сил на другие

заряженные тела. Когда электрически заряженное тело внезапно приходит в движение,

112

электромагнитное поле меняется сначала только вблизи тела, а затем это изменение поля распространяется со скоростью света. На самом деле в этом случае изменения электромагнитного поля *и есть* то, что известно нам как свет, хотя это может быть свет такой большой или маленькой длины волны, которая недоступна нашему зрению.

В рамках доквантовой физики специальная теория относительности Эйнштейна хорошо согласовывалась с дуалистичной картиной природы: есть частицы, например электроны, протоны, нейтроны в обычных атомах, и есть поля — гравитационное или электромагнитное. Развитие квантовой механики привело к значительно более единой картине. С точки зрения квантовой механики энергия и импульс поля (например, электромагнитного) распространяются в виде сгустков, называемых фотонами, которые ведут себя как частицы, хотя и не имеющие массы. Аналогично, энергия и импульс гравитационного поля переносятся в виде сгустков, называемых гравитонами¹⁰³, также ведущими себя как частицы с нулевой массой. В длинно-действующем силовом поле вроде гравитационного поля Солнца мы не наблюдаем отдельных гравитонов главным образом потому, что их чрезвычайно много.

В 1929 г. Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули, основываясь на более ранней работе Макса Борна, Гейзенберга, Паскуаля Йордана и Юджина Вигнера, объяснили в нескольких статьях, каким образом массивные частицы, такие как электрон, могут рассматриваться как сгустки энергии и импульса в полях разного типа, например электронном поле. Точно так же, как электромагнитная сила между двумя электронами возникает в рамках квантовой механики в результате обмена фотонами, так и сила между фотонами и электронами порождается обменом электронами. Различие между материей и силой в значительной степени исчезает: каждая частица может играть роль пробного тела, на которое действуют силы, но эта же частица, участвуя в обмене, может порождать другие силы. В наши дни общепринято считать, что единственный способ, позволяющий объединить принципы специальной теории относительности и квантовой механики, достигается в квантовой теории поля или в подобной теории. Это и есть та самая логическая жесткость, которая придает красоту истинно фундаментальной теории: квантовая механика и специальная теория относительности почти несовместимы и их союз в рамках квантовой теории поля накладывает сильные ограничения на возможные способы взаимодействия частиц друг с другом.

Все вышеупомянутые симметрии только ограничивают те типы сил и виды материи, которые может содержать теория, но сами по себе эти симметрии *не требуют* обязательного существования никакого определенного вида материи или силы. В XX в., особенно в последние десятилетия, значение принципов симметрии поднялось

113

на новый качественный уровень: именно они определяют сейчас само существование всех известных сил в природе.

В общей теории относительности основополагающий принцип симметрии утверждает, что *все* системы отсчета эквивалентны: законы природы выглядят одинаково не только для наблюдателей, движущихся с любой постоянной скоростью, но вообще для всех наблюдателей, как бы ускоренно не двигались и не вращались их лаборатории. Представьте, что мы заберем свои физические приборы из тиши университетской лаборатории и начнем производить эксперименты на равномерно вращающейся карусели. Вместо того, чтобы отсчитывать все направления от севера, мы станем измерять их по отношению к деревянным лошадам, укрепленным на вращающейся карусели. На первый взгляд все законы природы станут выглядеть совершенно иначе. Наблюдатели на вращающейся карусели ощущают центробежную силу, которая отбрасывает все незакрепленные предметы к наружному борту карусели. Если бы физики родились и выросли на карусели и не знали бы, что они находятся на вращающейся платформе, то сформулированные ими для описания природных явлений законы механики обязательно включали бы центробежную силу так что эти законы выглядели бы существенно иначе, чем те, которые известны нам.

Исаак Ньютон был очень встревожен тем, что законы природы, по-видимому, различают неподвижную и вращающуюся системы отсчета. Это тревожило физиков и в последующие столетия. В 1880-е гг. физик и философ из Вены Эрнст Мах указал на другую возможную интерпретацию этого явления. Мах подчеркнул, что есть еще кое-что, помимо центробежной силы, отличающее вращающуюся карусель от обычной лаборатории. С точки зрения астронома, находящегося на карусели, Солнце, звезды, галактики — короче говоря, вся материя во Вселенной кажется вращающейся вокруг зенита. Вы или я скажем, что это происходит, потому что вращается карусель, но астроном, выросший на карусели и, естественно, использующий ее как систему отсчета, будет настаивать, что вся остальная Вселенная вращается вокруг него. Мах задал вопрос, а нельзя ли рассматривать это великое кажущееся вращение материи как причину возникновения центробежной силы. Если так, то обнаруженные на карусели законы природы на самом деле ничем не отличаются от тех, которые найдены в более привычных лабораториях; кажущаяся разница возникает просто от того, что наблюдатели в разных лабораториях видят вокруг себя разные вещи.

Догадка Маха была подхвачена Эйнштейном и приняла конкретные формы в общей теории относительности. В этой теории действительно существует влияние далеких звезд, создающее эффект центробежной силы на вращающейся карусели. Это сила тяготения. Конечно, в ньютоновской теории тяготения нет ничего, кроме про-

114

стого притяжения между массами. Общая теория относительности более сложна: вращение материи Вселенной вокруг зенита, наблюдаемое на карусели, порождает поле, чем-то напоминающее магнитное поле, образуемое током, циркулирующим в катушке электромагнита. Именно эта *«гравимагнитная»* сила производит в системе отсчета, связанной с каруселью, эффекты, которые в более привычных системах отсчета приписываются центробежной силе. Уравнения общей теории относительности, в противоположность уравнениям ньютоновской механики, сохраняют свой вид как в лаборатории на карусели, так и в обычной лаборатории; вся разница в наблюдениях в этих лабораториях полностью связана с разным окружением — в одном случае Вселенная вращается вокруг зенита, в другом случае — нет. Однако, если тяготения не существует, такая интерпретация центробежной силы была бы невозможной, так что сила, которую мы ощущаем, находясь на карусели, позволила бы отличить систему отсчета, связанную с этой каруселью, от более привычных лабораторных систем. Этим была бы исключена какая бы то ни было эквивалентность между вращающимися и неподвижными лабораториями. Отсюда можно сделать вывод: *симметрия между различными системами отсчета требует существования*

гравитации.

Симметрия, которая лежит в основе электрослабой теории, еще более необычна. Она не имеет никакого отношения к изменению нашей точки зрения в пространстве и времени, а связана с изменением нашей точки зрения об идентичности разных типов элементарных частиц. Как мы видели ранее, частица может находиться в таком квантово-механическом состоянии, когда про нее нельзя сказать с достоверностью, что она находится здесь или там или вращается по часовой стрелке или против часовой стрелки. Те же удивительные свойства квантовой механики позволяют частице находиться в состоянии, когда она не является с определенностью ни электроном, ни нейтрино, и это состояние существует до тех пор, пока мы не осуществим измерение некоторого свойства, отличающего эти две частицы, например их электрического заряда. В электрослабой теории форма законов природы не изменяется, если во всех наших уравнениях поменять электроны и нейтрино на такие смешанные состояния, которые не являются ни той, ни другой частицей. Поскольку с электронами и нейтрино взаимодействует множество других типов частиц, то одновременно необходимо перемешать семейства этих других частиц¹⁰⁴, например смешать *u*-кварки с *d*-кварками или фотоны с их родственниками — положительно и отрицательно заряженными *W*-частицами и нейтральными *Z*-частицами. Такая симметрия связывает электромагнитные силы, вызываемые обменом фотонами, со слабыми ядерными силами, которые порождаются обменом *W*- и *Z*-частицами. В электрослабой теории фотоны, *W*- и *Z*-частицы являются сгустками энергии четырех полей, существование которых диктуется симметрией-

115

ей электрослабой теории во многом аналогично тому, как гравитационное поле диктуется симметрией общей теории относительности.

Симметрии, подобные той, которая лежит в основе электрослабой теории, называются *внутренними симметриями*, так как мы воспринимаем их как некоторое внутреннее свойство частиц, не связанное с их положением в пространстве или характером движения. Внутренние симметрии менее знакомы нам, чем симметрии, действующие в обычном пространстве и времени и определяющие структуру ОТО. Чтобы чуть-чуть лучше понять, о чем идет речь, вы можете представить, что у каждой частицы есть маленький циферблат, стрелка которого показывает направления, помеченные словами «электрон» или «нейтрино», или «фотон» и «*W*», или находится в любом промежуточном состоянии. Внутренняя симметрия утверждает, что законы природы не меняют своей формы, если мы станем произвольным образом вращать стрелки на этих циферблатах.

Более того, в рамках того типа симметрий, которые определяют электрослабые силы, мы можем вращать эти стрелки по-разному для частиц в разных местах и в разные моменты времени. Это уже во многом похоже на симметрию, лежащую в основе общей теории относительности, которая позволяет поворачивать наши лаборатории не только на постоянный угол, но и на угол, увеличивающийся со временем, если, например, поместить лабораторию на карусель. Инвариантность законов природы по отношению к совокупности преобразований внутренних симметрий, которые зависят от местоположения и времени, называется *локальной* симметрией (поскольку результат преобразования симметрии зависит от положения в пространстве и времени) или *калибровочной* симметрией (по чисто историческим причинам)¹⁰⁵. Именно локальная симметрия между разными системами отсчета в пространстве и времени приводит к необходимости существования тяготения. Во многом аналогичным образом другая локальная симметрия — между электронами и нейтрино (а также между *u*- и *d*-кварками и т.д.) — приводит к необходимости существования фотона и *W*- и *Z*-частиц.

Есть еще и другая точная локальная симметрия, связанная с внутренними свойствами кварков и получившая причудливое название «цвет»¹⁰⁶. Мы видели, что существуют кварки разных типов, например кварки *u* и *d*, из которых сделаны протоны и нейтроны, входящие в состав всех обычных атомных ядер. Но кварки каждого из этих типов существуют в трех различных цветовых состояниях, которые физики (по крайней мере в США) часто называют красным, белым и синим. Конечно, все это не имеет никакого отношения к обычному цвету, а есть всего лишь способ отличить разновидности кварков данного типа. Насколько мы сейчас знаем, в природе существует точная симметрия между всеми цветами. Иными словами, сила, действующая между красным и белым кварками, равна силе,

116

действующей между белым и синим кварками, а силы, действующие между двумя красными или двумя синими кварками, также равны друг другу. Но эта симметрия намного шире, чем просто симметрия по отношению к замене цветов кварков друг на друга. Согласно законам квантовой механики, можно рассматривать состояния отдельных кварков, которые не являются с определенностью красными, белыми или синими. Законы природы будут иметь точно ту же форму, если заменить красный, белый и синий кварки на кварки в трех подходящих смешанных состояниях (например, фиолетовый, розовый и бледно-лиловый). Опять же по аналогии с общей теорией относительности тот факт, что законы природы остаются прежними, даже если смешивание изменяется от точки к точке в пространстве и времени, приводит к необходимости включить в теорию семейство полей, аналогичных гравитационному полю и взаимодействующих с кварками. Таких полей восемь; их называют полями глюонов³, так как большие силы, которые они порождают, склеивают вместе кварки внутри протонов и нейтронов. Современная теория этих сил, *квантовая хромодинамика*, как раз и есть теория кварков и глюонов, подчиняющаяся локальной цветовой симметрии. Стандартная модель элементарных частиц состоит из теории электрослабого взаимодействия и квантовой хромодинамики.

Я упоминал, что принципы симметрии придают теориям определенную жесткость. Может показаться, что это недостаток, что физик хочет развивать теории, способные охватить как можно более широкий круг явлений, и поэтому предпочел бы, чтобы теории были как можно более гибкими и не теряли смысла при самых разных обстоятельствах. Да, во многих областях науки это верно, но только не в той области фундаментальной физики, о которой идет речь. Мы находимся на пути к чему-то универсальному, к чему-то, что управляет физическими явлениями везде во Вселенной, к тому, что мы называем законами природы. Мы не хотим разрабатывать теорию, способную описать все мыслимые типы сил, которые могли бы действовать между частицами в природе. Напротив, мы надеемся найти такую теорию, которая жестко позволила бы нам описать только те силы — гравитационную, электрослабую и сильную, которые существуют на самом деле. Жесткость такого рода в наших физических теориях есть часть того, что мы понимаем под их красотой.

Но не только принципы симметрии придают нашим теориям жесткость. Основываясь только на этих принципах, мы не

смогли бы прийти к электрослабой теории или квантовой хромодинамике; эти теории выступали бы как частные случаи намного более широкого круга теорий с неограниченным набором настраиваемых констант, которые могли бы выбираться совершенно произвольно. Дополнительные

³⁾ Название «глюон» произошло от англ. *glue* (клей). — Прим. перев.

117

ограничения, позволяющие отобрать нашу простую стандартную модель из множества других, более сложных, теорий, удовлетворяющих тем же принципам симметрии, связаны с требованием, чтобы полностью сокращались все бесконечности, которые возникают в вычислениях. (Иначе говоря, теория должна быть «перенормируемой»¹⁰⁷.) Это условие, как оказывается, придает уравнениям теории большую простоту и вместе с разными локальными симметриями позволяет придать законченную форму нашей стандартной модели элементарных частиц.

Красота, которую мы обнаруживаем в таких теориях, как ОТО или стандартная модель, сродни той красоте, которую мы ощущаем в некоторых произведениях искусства благодаря вызываемому ими ощущению законченности и неизбежности: не хочется менять ни одной ноты, ни одного мазка кисти, ни одной строки. Однако, как и в нашем восприятии музыки, живописи или поэзии, это ощущение неизбежности есть дело вкуса и опыта и не может быть сведено к «сухой» формуле.

Каждые два года лаборатория им. Лоуренса в Беркли издает маленькую книжечку, в которой перечислены известные на данный момент свойства элементарных частиц⁴⁾. Если я выскажу утверждение: фундаментальным законом природы является то, что элементарные частицы имеют свойства, которые перечислены в книжечке, то отсюда можно будет сделать вывод, что известные свойства элементарных частиц следуют из этого фундаментального принципа. Этот принцип даже имеет некоторую предсказательную силу: каждый новый протон или электрон, созданный в наших лабораториях, будет иметь те самые массу и заряд, которые указаны в этой книжечке. Но, взятый сам по себе, этот принцип настолько уродлив, что никто и не подумает, будто вопрос исчерпан. Уродливость этого принципа — в отсутствии простоты и неизбежности. Ведь книжечка содержит тысячи чисел, и любое из них можно изменить, не превратив остальную информацию в глупость. Нет никакой логической формулы, которая устанавливала бы четкую границу между красивой теорией, способной что-то объяснить, и простым перечислением данных, но мы знаем, что эта граница существует, когда мы ее видим: мы требуем простоты и жесткости наших принципов, прежде чем принять их всерьез. Итак, наши эстетические суждения есть не только средство, помогающее нам найти научные объяснения и оценить их пригодность; *эти суждения есть часть того, что мы подразумеваем под объяснением.*

Иные ученые иногда подшучивают над физиками, занимающимися элементарными частицами, так как сейчас открыто столько так

Впервые список всех известных частиц для общего пользования был составлен в 1962 г. Леоном Розенфельдом и получил название таблиц Розенфельда. Первые таблицы умещались на одной странице. Сейчас это книжка объемом более двухсот страниц. — Прим. перев.

118

называемых элементарных частиц, что нам приходится все время таскать с собой упомянутую книжечку, чтобы в нужный момент вспомнить о характеристиках какой-то из них. Но само по себе число частиц несущественно. Как сказал Абдус Салам, природа экономит не на частицах или силах, а на принципах. Важно установить набор простых, экономных принципов, которые объясняли бы, почему частицы такие, какие они есть. Конечно, огорчительно, что до сих пор у нас нет полной теории того типа, которого хотелось бы. Но когда такая теория будет построена, уже будет не очень существенно, сколько сортов частиц или сил она описывает, если только она делает это красиво, как неизбежное следствие простых принципов.

Тот тип красоты, который мы обнаруживаем в физических теориях, очень ограничен. Если только мне удалось правильно схватить суть и выразить ее в словах, речь идет о красоте простоты и неизбежности, о красоте идеальной структуры, красоте подогнанных друг к другу частей целого, красоте неизменяемости, логической жесткости. Такая красота классически строга и экономна, она напоминает красоту греческих трагедий. Но ведь это не единственный тип красоты, известный нам в искусстве. Например, мы не найдем этой красоты в пьесах Шекспира, по крайней мере, если не касаться его сонетов. Часто постановщики шекспировских пьес выкидывают целые куски текста. В экранизации «Гамлета» Лоуренсом Оливье Гамлет не говорит: «О, что за дрянь я, что за жалкий раб!...» И тем не менее пьеса не разрушается, так как шекспировские пьесы не обладают совершенной и экономной структурой, как общая теория относительности или «Царь Эдип»; наоборот, эти пьесы представляют собой запутанные композиции, причем их беспорядочность отражает сложность реальной жизни. Все это составляет часть красоты пьес Шекспира, которая, на мой вкус, более высокого порядка, чем красота пьесы Софокла или красота ОТО. Пожалуй, самые сильные моменты в пьесах Шекспира — это те, когда он полностью пренебрегает канонами греческой трагедии и внезапно вводит в действие комичного простака, какого-нибудь слугу, садовника, продавца смокв или могильщика, и делается это как раз перед тем, как главные герои пьесы встречаются со своей судьбой. Несомненно, красота теоретической физики была бы очень дурным образцом для произведений искусства, но так или иначе она доставляет нам радость и служит путеводной нитью.

Есть и еще одно обстоятельство, которое заставляет меня думать, что теоретическая физика — плохой образец для искусств. Наши теории очень закрыты для всеобщего обозрения, причем по необходимости, так как мы вынуждены пользоваться при развитии этих теорий языком математики, не ставшей пока что частью интеллектуального багажа всей образованной публики. Вообще говоря, физики не любят признаваться, что их теории так эзотеричны. С другой стороны, я не один раз слышал, как некоторые художники с гордостью

119

говорили о том, что их картины доступны для понимания только маленькой группе единомышленников, и в качестве подтверждения ссылались на пример физических теорий, вроде общей теории относительности, которые также понятны лишь избранным. Конечно, художники, как и физики, не всегда могут быть понятными широкой публике, однако эзотеризм как самоцель — просто глупость.

Хотя мы ищем теории, красота которых основана на жесткости, которую дают простые основополагающие принципы, все же создание теории — это не просто математический вывод следствий из набора заранее предписанных принципов. Эти

принципы часто формулируются в процессе нашего продвижения вперед, иногда специально в такой форме, которая приводит к желаемой нами степени жесткости теории. У меня нет сомнений в том, что одна из причин, по которой Эйнштейн был так удовлетворен собственной идеей об эквивалентности гравитации и инерции, заключалась в том, что этот принцип приводил лишь к одной-единственной достаточно удовлетворительной теории тяготения, а не к бесконечно большому множеству возможных теорий. Получение следствий из определенного набора четко сформулированных физических принципов может оказаться делом сложным или не очень, но именно этому и учат физиков в высшей школе, и именно этим они, вообще говоря, любят заниматься. Формулировка же *новых* физических принципов — мучительный процесс, и этому, по-видимому, нельзя научить.

Красота физических теорий находит отражение в жестких математических структурах, основанных на простых основополагающих принципах. Поразительно, что даже если принципы оказываются неверными, структуры, обладающие красотой подобного типа, выживают. Хорошим примером является теория электрона Дирака. В 1928 г. Дирак попытался пересмотреть шредингеровскую версию квантовой механики, основанную на волнах частиц, с тем чтобы совместить ее с специальной теорией относительности. Эта попытка привела Дирака к выводу, что электрон должен обладать определенным спином и что Вселенная заполнена ненаблюдаемыми электронами с отрицательной энергией, *отсутствие* которых в определенной точке наблюдалось бы в лаборатории как наличие электрона с противоположным зарядом, т. е. античастицы электрона. Теория Дирака завоевала необычайный авторитет после открытия в 1932 г. в космических лучах как раз такой античастицы электрона, получившей название позитрона. Эта теория стала ключевой составной частью квантовой электродинамики, развитой и успешно примененной для анализа физических явлений в 30-х и 40-х гг. Однако сегодня мы знаем, что точка зрения Дирака была во многом ошибочной. Правильным способом объединения квантовой механики и специальной теории относительности оказалась не релятивистская версия волновой механики Шрёдингера, как думал Дирак, а более общий формализм, разработанный Гейзенбергом

120

и Паули в 1929 г. и известный под названием квантовой теории поля. В этой теории не только фотон рассматривается как сгусток энергии поля, а именно электромагнитного поля, но и электроны, и позитроны являются сгустками энергии электронного поля, и все другие частицы представляют сгустки энергии различных полей. Почти по случайным причинам дираковская теория электрона привела к тем же результатам, что и квантовая теория поля, для процессов с участием только электронов, позитронов и фотонов. Но квантовая теория поля является значительно более общей: она может рассматривать процессы типа ядерного бета-распада, которые совершенно непостижимы в рамках теории Дирака¹⁰⁸. В квантовой теории поля нет никаких специальных требований, чтобы частица имела какой-то определенный спин. Оказалось, что спин электрона как раз такой, какой требует теория Дирака, но есть и другие частицы, с другими спинами, и у них тоже есть античастицы, причем все это не имеет никакого отношения к отрицательным энергиям и связанным с ними рассуждениям Дирака¹⁰⁹. Однако *математический формализм* дираковской теории сохранился как существенная часть квантовой теории поля. Его обязаны изучать в любом курсе лекций по современной квантовой теории для старшекурсников. Таким образом, формальная структура теории Дирака пережила смерть принципов релятивистской волновой теории, которым следовал Дирак при построении своей теории.

Итак, математические структуры, развиваемые учеными для реализации физических принципов, обладают странным свойством подвижности. Их можно переносить от одного концептуального окружения к другому, они могут служить разным целям. Так, лопаточные кости в теле человека играют роль соединения между крыльями и телом птицы или лапами и телом дельфина. Физические принципы приводят к красивым структурам, которые остаются жить, даже когда умирают принципы.

Возможное объяснение было предложено Нильсом Бором¹¹⁰. Рассуждая в 1922 г. о будущем своей ранней теории строения атомов, он заметил, что «в математике существует ограниченное число форм, которые нам удастся использовать для описания природы, и может так случиться, что кто-нибудь обнаружит правильные формы, исходя из совершенно неверных представлений». Бор оказался совершенно прав в отношении будущего собственной теории: принципы, лежащие в ее основе, были отвергнуты, но мы до сих пор используем некоторые элементы ее языка и методы вычислений.

Именно применение чистой математики к физике дает поразительные примеры эффективности эстетических суждений. Уже давно стало общим местом утверждение, что математики руководствуются в своей работе желанием построить такой формализм, принципы которого красивы. Английский математик Г. Харди пояснял, что «математические структуры должны быть так же красивы, как те, которые

121

используют художники или поэты. Идеи, как краски или слова, должны гармонично сочетаться друг с другом. Красота — первый тест. Уродливой математике нет места»¹¹¹. И вот оказалось, что благоговейно разрабатывавшиеся математиками структуры, в которых они искали красоту, позднее часто становились необычайно важными для физиков.

Для иллюстрации вернемся к примеру с неевклидовой геометрией и общей теорией относительности. В течение двух тысяч лет после Евклида математики пытались выяснить, являются ли независимыми друг от друга те предположения, которые лежат в основе евклидовой геометрии. Если постулаты не независимы, если какие-то из них могут быть выведены из других, тогда лишние должны быть отброшены, что приведет к более экономной, а следовательно более красивой формулировке геометрии. Попытки разобраться в структуре евклидовой геометрии достигли пика к началу XIX в., когда «король геометров» Карл Фридрих Гаусс и другие ученые¹¹² разработали неевклидову геометрию, применимую для искривленного пространства определенного типа, в котором выполнены все постулаты Евклида, кроме пятого¹¹³. Этим было доказано, что пятый постулат Евклида действительно логически независим от остальных. Новая геометрия была построена, чтобы ответить на давний вопрос об основаниях геометрии, а совсем не для того, чтобы применять ее к реальному миру.

Затем один из величайших математиков, Георг Фридрих Бернгард Риман, развил неевклидову геометрию, обобщив ее на общую теорию искривленных пространств в двух, трех или произвольном числе измерений. Не имея никакого представления о возможных физических приложениях, математики продолжали трудиться над развитием римановой геометрии, так как она поражала своей красотой. Эта красота во многом опять была красотой неизбежности. Достаточно начать размышлять над свойствами искривленных пространств, и вы почти неизбежно придете к необходимости введения

математических понятий (метрика, аффинная связность, тензор кривизны), являющихся неотъемлемыми частями римановой геометрии. Когда Эйнштейн начал развивать общую теорию относительности, он вскоре понял, что один из способов реализации его идей о симметрии между различными системами отсчета заключается в том, чтобы описать тяготение как кривизну пространства-времени. Эйнштейн поинтересовался у своего друга, математика Марселя Гроссмана, не существует ли какой-нибудь теории искривленных пространств — не просто искривленных двумерных поверхностей в обычном трехмерном евклидовом пространстве, а искривленных трехмерных и даже четырехмерных пространств? Гроссман обрадовал Эйнштейна, сказав, что такой математический формализм существует, он развит Риманом и другими математиками. Более того, Гроссман обучил Эйнштейна этой математике, которая затем вошла составной частью в общую теорию относитель-

122

ности. Таким образом, получается, что математика ждала появления Эйнштейна, который сумел ее использовать для физики, хотя я полагаю, что ни Гаусс, ни Риман, ни другие специалисты по-дифференциальной геометрии XIX в. понятия не имели, что их работа когда-нибудь будет иметь хоть какое-то отношение к физической теории тяготения.

Еще более странным является пример с историей открытия принципов внутренней симметрии. В физике эти принципы обычно отражают нечто вроде семейных связей между отдельными членами в списке возможных элементарных частиц. Первый известный пример такой симметрии связан с двумя типами частиц, из которых состоят обычные атомные ядра, — протоном и нейтроном. Массы протона и нейтрона почти одинаковы, так что, когда нейтрон был открыт Джеймсом Чедвиком в 1932 г., сразу же возникло естественное предположение, что сильные ядерные силы (дающие вклад в массы нейтрона и протона) должны обладать простой симметрией: уравнения, определяющие эти силы, должны сохранять свой вид, если везде в них поменять местами роли протонов и нейтронов. Помимо прочего, из такой гипотезы следует, что сильные ядерные силы, действующие между двумя нейтронами, равны таким же силам, действующим между двумя протонами. Однако ничего нельзя сказать о силе, действующей между протоном и нейтроном. Поэтому несколько неожиданным оказался результат экспериментов, подтвердивших в 1936 г., что ядерные силы, действующие между двумя протонами, равны таким же силам, действующим между протоном и нейтроном¹¹⁴. Это наблюдение породило идею симметрии, выходящей за рамки простой замены протонов на нейтроны и наоборот. Речь идет о симметрии по отношению к непрерывным преобразованиям, превращающим протоны и нейтроны в частицы, являющиеся суперпозициями протонов и нейтронов, с произвольной вероятностью находиться в протонном или нейтронном состояниях.

Подобные преобразования симметрии действуют на метку частицы, которая отличает протоны от нейтронов, способом, который математически совпадает с тем, как обычные вращения в трехмерном пространстве действуют на спины частиц, вроде протона, нейтрона или электрона¹¹⁵. Помня об этом примере, многие физики вплоть до начала 60-х гг. молчаливо предполагали, что по аналогии с вращениями, переводящими протон и нейтрон друг в друга, все преобразования внутренней симметрии, оставляющие неизменными законы природы, должны иметь форму вращений в некотором внутреннем пространстве двух, трех или более измерений. Учебники, в которых излагалось применение принципов симметрии к физике (включая классические книги Германа Вейля и Юджина Вигнера) даже не упоминали о других математических возможностях. Только в конце 50-х гг., после открытия множества новых частиц сначала в космических лучах, а позднее на ускорителях вроде бэватрона в Беркли,

123

в среде физиков-теоретиков возникло более широкое понимание возможностей описания внутренних симметрий. Новые частицы, казалось, объединялись в значительно более обширные семейства, чем простая пара протон—нейтрон. Например, обнаружилось, что протон и нейтрон несут черты фамильного сходства с шестью другими частицами, называемыми гиперонами и имеющими тот же спин и близкие массы. Какой же тип внутренней симметрии может порождать такие обширные родственные группы?

В начале 60-х гг. физики, занимавшиеся этим вопросом, обратились за помощью к литературе по математике. Для них оказалось приятным сюрпризом, что математики уже давно составили в некотором смысле полный каталог всех возможных симметрий. Полный набор преобразований, оставляющих что-то неизменным, будь то конкретный объект или законы природы, образует математическую структуру, называемую *группой*, а раздел математики, изучающий преобразования симметрии, называется *теорией групп*¹¹⁶. Каждая группа характеризуется абстрактными математическими правилами, не зависящими от того, что подвергается преобразованию, так же как правила арифметики не зависят от названий тех величин, которые мы складываем или умножаем. Список типов семейств, разрешенных каждой конкретной симметрией законов природы, полностью определяется математической структурой группы симметрии.

Те группы преобразований, которые действуют непрерывно, наподобие вращений в обычном пространстве или смешивания электронов и нейтрино в электрослабой теории, называются *группами Ли* — по имени норвежского математика Софуса Ли. Французский математик Эли Картан в своей диссертации в 1894 г. дал полный список всех «простых» групп Ли¹¹⁷, с помощью комбинаций которых можно построить все остальные группы. В 1960 г. Мюррей Гелл-Манн и израильский физик Ювал Нееман независимо обнаружили, что одна из этих простых групп Ли, известная под названием *SU(3)*, как раз правильно описывает структуру семейств множества элементарных частиц в согласии с экспериментальными данными. Гелл-Манн позаимствовал некоторые понятия буддизма и назвал новую симметрию восьмеричным путем⁵, так как известные на опыте частицы лучше всего делились на семейства по восемь членов, как протон, нейтрон и шесть их родственников. К тому времени не все семейства были полными. Так, нужна была новая частица, чтобы заполнить семейство из десяти частиц, похожих на нейтрон, протон и гипероны, но имеющих вдвое больший спин. Одним из больших успехов новой *SU(3)* симметрии стало то, что предсказанная частица была обнару-

⁵ Речь идет о знаменитой первой проповеди Сиддхартхи Гаутамы (Будды), в которой он сформулировал восьмеричный путь избавления от страданий и достижения вечного блаженства (нирваны): правильные взгляды, правильные намерения, правильные речи, правильные действия и т. д. — *Прим. перев.*

124

жена в 1964 г. в Брукхейвене¹¹⁸, причем значение ее массы совпало с теоретической оценкой Гелл-Манна.

Теория групп, оказавшаяся столь полезной для физики, была на самом деле придумана математиками по причинам, относящимся к сугубо внутренним математическим проблемам. Толчок к развитию теории групп дал в начале XIX в. Эварист Галуа в своем доказательстве того, что не существует общих формул для решения определенных алгебраических уравнений (включающих пятую или более высокую степень неизвестной величины)¹¹⁹. Ни Галуа, ни Ли, ни Картан не имели ни малейшего представления, как можно было бы применить теорию групп в физике.

Чрезвычайно удивительно, что чувство математической красоты всегда приводило математиков к построению формальных структур, которые оказывались впоследствии полезными для физиков, даже несмотря на то, что сами математики ни о чем подобном не помышляли. В широко известном эссе физика Юджина Вигнера¹²⁰ это явление так и называется: «непостижимая эффективность математики». Физики считают, что способность математиков предвидеть, какие математические средства понадобятся для развития физических теорий, совершенно фанатастична. Это похоже на то, как если бы Нейл Армстронг, делая в 1969 г. первые шаги по поверхности Луны, увидел бы в лунной пыли отпечатки сапог Жюль Верна.

Так *в чем же* обретает физик ощущение красоты, которое помогает не только открывать теории, описывающие реальный мир, но и оценивать справедливость этих теорий, иногда противоречащих существующим экспериментальным данным? И каким образом чувство математической красоты приводит к построению структур, которые десятилетия спустя оказываются полезными для физиков, несмотря на то, что сами математики совершенно не интересуются физическими приложениями?

Мне кажется, что имеются три приемлемых объяснения, два из которых применимы к большинству разделов науки вообще, а третий относится именно к наиболее фундаментальным вопросам физики. Первое объяснение заключается в том, что сама Вселенная воздействует на нас как случайная, неэффективная, но все же, если взять большой промежуток времени, мощная обучающая машина. Точно так же, как в результате серии случайных событий атомы углерода, азота, водорода и кислорода соединились вместе, образовав примитивные формы жизни, которые затем эволюционировали в простейшие живые существа, рыб и человека, так и в наших взглядах на Вселенную постоянно происходил естественный отбор идей. Преодолевая бесчисленное множество фальстартов, мы сумели вбить себе в головы, что природа устроена определенным образом, и выросли с мыслью, что именно это устройство природы прекрасно.

125

Похожим образом, вероятно, каждый из нас объяснил бы, почему чувство прекрасного помогает тренеру угадать, какая из лошадей выиграет скачку. Тренер много лет не покидает ипподром, он видел бесчисленное множество как выигравших, так и проигравших лошадей, и он научился, даже не умея это выразить словами, сопоставлять какие-то наглядные приметы с ожиданием, что именно эта лошадь победит.

Одно из занятий, делающих историю науки бесконечно увлекательной, заключается в том, чтобы проследить за медленным изменением наших представлений о типе красоты, ожидаемой в природе. Однажды я пустился в раскопки оригинальных статей 30-х гг., посвященных первым попыткам формулировки принципов внутренней симметрии в ядерной физике, той симметрии, о которой выше упоминалось как о симметрии между протонами и нейтронами. Моя цель была в том, чтобы найти ту первую статью, в которой этот принцип симметрии сформулирован так, как это делается в наши дни, т. е. как фундаментальный самостоятельный закон ядерной физики, не зависящий от конкретной теории ядерных сил. Я не смог найти такой статьи. Создалось впечатление, что в 30-е гг. писать статьи, посвященные принципам симметрии, считалось дурным тоном. Хорошим же тоном считалось писать статьи о ядерных силах. Если оказывалось, что силы обладают определенной симметрией, тем лучше. Так, если вам были известны силы, действующие между протоном и нейтроном, вам не надо было гадать, какие силы действуют между двумя протонами. Но сам по себе принцип симметрии не рассматривался, как я уже сказал, как свойство, обосновывающее справедливость теории и делающее ее красивой. Принципы симметрии рассматривались как математические трюки; реальное же дело физиков было в том, чтобы разрабатывать динамическую теорию наблюдаемых сил.

Сейчас времена изменились. Если экспериментаторам удастся открыть какие-то новые частицы, образующие те или иные семейства, вроде протон-нейтронного дублета, тут же почтовый ящик заполняется сотнями препринтов теоретических статей, рассуждающих на тему о том, какая же симметрия определяет структуру этих семейств. Если обнаружится новый тип сил, мы все начнем размышлять о том, какая же симметрия определяет существование этой силы. Очевидно, что мы изменились благодаря обучающему воздействию природы, которая привила нам ощущение красоты, отсутствовавшее в наших первоначальных представлениях.

Даже математики живут все-таки в реальном мире и откликаются на его уроки. В течение двух тысячелетий школьникам преподавалась геометрия Евклида как почти идеальный пример абстрактного дедуктивного способа мышления. Однако благодаря общей теории относительности мы узнали в XX в., что евклидова геометрия хорошо работает только потому, что гравитационное поле на поверхности

126

Земли довольно слабо, так что пространство, в котором мы живем, не имеет заметной кривизны. Формулируя свои постулаты, Евклид действовал, по-существу, как физик, используя свой опыт жизни в слабых гравитационных полях эллинистической Александрии для создания теории неискривленного пространства. Он не мог знать, насколько ограничена и обусловлена его геометрия. Действительно, только сравнительно недавно мы научились отличать чистую математику от той науки, к которой она применяется. Лукасовскую кафедру в Кембридже занимали Ньютон и Дирак, но тем не менее официально она до сих пор называется кафедрой математики, а не физики. Только развитие строгого и абстрактного стиля математического мышления¹²¹, восходящее к работам Огюстена Луи Коши и других математиков в начале XIX в., привело к тому, что идеалом математиков стало, чтобы их работы были независимы от опыта и здравого смысла.

Вторая причина, почему мы считаем, что успешные физические теории должны быть красивы, заключается просто в том, что ученые стремятся выбирать для исследования только такие задачи, у которых можно ожидать красивых решений. Точно такой же стиль рассуждений присущ и нашему другу — тренеру. Его работа — тренировать лошадей для того, чтобы они выигрывали скачки; он научился определять, какая из лошадей имеет больше шансов на выигрыш, и называет таких лошадей красивыми; но если вы отведете тренера в сторонку и пообещаете никому не передавать то, что он скажет, то он

поклоняется вам, что единственная причина, почему он занят этим делом — тренировкой лошадей для выигрыша скачек, заключается в том, что лошади, которых он тренирует, чертовски красивы.

Хороший пример сказанного в физике — явление мягких фазовых переходов⁶⁾, например спонтанного исчезновения намагниченности при нагревании постоянного железного магнита до температуры выше 770°C , известной как точка Кюри. Поскольку переход мягкий, намагниченность куска железа обращается в нуль постепенно, при приближении температуры к точке Кюри. Удивительным в таких фазовых переходах является *закон*, по которому намагниченность стремится к нулю. Оценивая различные энергии в магните, физики были склонны предполагать, что, когда температура чуть ниже точки Кюри, намагниченность должна быть просто пропорциональна квадратному корню из разности между температурой Кюри и температурой нагрева. Вместо этого экспериментально наблюдается, что

⁶⁾ То, что я называю «мягким» фазовым переходом, чаще называют «фазовым переходом второго рода». Это делается для того, чтобы отличать такие фазовые переходы от «фазовых переходов первого рода», вроде кипения воды при 100°C или таяния льда при 0°C , в которых свойства вещества меняются скачкообразно. На то, чтобы превратить лед при 0°C в воду при той же температуре или воду при 100°C в водяной пар, необходимо затратить некоторое количество энергии (так называемой скрытой теплоты). Однако на то, чтобы истребить в куске железа все его магнитные свойства в точке Кюри, никакой дополнительной энергии не требуется.

127

намагниченность пропорциональна этой разности в степени 0,37. Иными словами, зависимость намагниченности от температуры оказывается где-то в промежутке между законом пропорциональности квадратному корню (показатель степени 0,5) и кубическому корню (показатель степени 0,33) из разности между температурой Кюри и температурой нагрева магнита.

Степени типа 0,37 называются *критическими показателями*, иногда с добавлением слов «неклассические» или «аномальные», так как эти показатели отличаются от ожидаемых. Было обнаружено, что существуют и другие величины, ведущие себя аналогичным образом в разного рода фазовых переходах, причем в некоторых случаях критические показатели были теми же самыми. Те явления, где возникают критические показатели, не столь впечатляют, как черные дыры или расширение Вселенной. Тем не менее ряд выдающихся физиков-теоретиков во всем мире занимался проблемой критических показателей, пока наконец она не была решена в 1972 г. учеными из Корнеллского университета (США) Кеннетом Вильсоном и Майклом Фишером. Можно было бы думать, что точное вычисление самой точки Кюри имеет значительно больший практический интерес. Почему же корифеи физики твердого тела считали проблему критических показателей намного более важной?

Я полагаю, что эта проблема привлекала такое внимание потому, что физики чувствовали, что она должна иметь очень красивое решение. Указания на это вытекали прежде всего из факта универсальности явления, из того, что одни и те же критические показатели возникали в совершенно разных задачах. Кроме того, физики давно привыкли к тому, что наиболее существенные свойства физических явлений часто выражаются в форме закона, связывающего какую-то физическую величину со степенями других величин (примером может служить закон обратных квадратов для тяготения). Оказалось, что теория критических показателей обладает такой простотой и неизбежностью, что она стала одной из самых красивых теорий в всей физике. В то же время проблема вычисления точной температуры фазовых переходов необычайно запутанна, и ее решение требует знания сложных деталей устройства железа или других веществ, в которых происходит фазовый переход. Люди занимаются этой задачей либо исходя из практических потребностей, либо за неимением лучшего.

В ряде случаев первоначальные надежды ученых на построение красивой теории не оправдывались в полной мере. Хорошим примером может служить история открытия генетического кода. Фрэнсис Крик в своей автобиографии¹²² рассказывает, как после открытия им и Джеймсом Уотсоном структуры ДНК в виде двойной спирали внимание всех специалистов по молекулярной биологии обратилось на расшифровку кода, с помощью которого клетка считывает последовательность химических оснований в двух спиральных ДНК как

128

программу для построения нужных белковых молекул. Было известно, что белки строятся из цепочек аминокислот, что существует только двадцать аминокислот, существенных для функционирования практически всех животных и растений, что информация для выбора каждой последующей аминокислоты в молекуле белка заложена в выборе трех последовательных пар химических единиц, называемых основаниями, и, наконец, что имеются только четыре разных типа таких пар. Таким образом, генетический код содержит запись о трех последовательных комбинациях, каждая из которых выбрана из четырех возможных пар оснований, определяющих выбор каждой следующей аминокислоты из двадцати возможных, входящей в состав белковой молекулы. Молекулярные биологи предлагали кучу красивых принципов, управляющих этим кодом, например, что при выборе трех пар оснований никакая информация не будет растратчена впустую, и что любая информация, не требующаяся для определения аминокислоты, будет использована для поиска ошибок (как в компьютерных сетях, когда от одного компьютера к другому передаются лишние биты информации, чтобы убедиться в точности передачи сообщения). Ответ, найденный в 1960 г., оказался совсем иным. Генетический код во многом случаен: некоторые аминокислоты шифруются более чем одной тройкой пар оснований и, наоборот, некоторые тройки пар ничему не соответствуют¹²³. Конечно, генетический код не настолько плох, как полностью случайный код, откуда следует, что код как-то менялся в ходе эволюции, но все же любой специалист по передаче сообщений придумал бы код получше. Причина, конечно, в том, что генетический код не был *создан*, а развивался за счет случайных воздействий с самого начала возникновения жизни на Земле и был унаследован примерно в одном и том же виде всеми организмами. Ясно, что понимание генетического кода настолько важно, что мы изучаем его независимо от того, насколько он красив, но все же немножко жалко, что код оказался не таким красивым, как хотелось бы.

Иногда, когда нас подводит чувство красоты, это происходит потому, что мы переоцениваем фундаментальный характер того, что собираемся объяснить. Знаменитым примером служит работа молодого Иоганнеса Кеплера, посвященная размерам орбит планет.

Кеплер знал об одном из самых красивых утверждений, полученных греческими математиками, касающемся так называемых платоновских тел. Это трехмерные тела с плоскими гранями, причем все вершины, все грани и все ребра этих

тел одинаковы. Очевидным примером является куб. Древние греки доказали, что существует всего пять таких платоновских тел: треугольная пирамида (тетраэдр), куб, восьмигранный октаэдр, двенадцатигранный додекаэдр и двадцатигранный икосаэдр. (Свое название эти тела получили потому, что Платон в *Тимее* предложил взаимно-однозначное соответствие между этими пятью телами и предполагаемыми пятью основными элемен-

129

тами. Такую точку зрения затем критиковал Аристотель.) Существование платоновских тел — пример необычайной математической красоты; она сродни красоте картановского списка всех возможных непрерывных принципов симметрии.

В своем сочинении *Mysterium cosmographicum* Кеплер предположил, что существование ровно пяти платоновских тел объясняет, почему существует ровно пять (не считая Земли) планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн (в те времена Уран, Нептун и Плутон еще не были открыты). Каждой из этих пяти планет Кеплер сопоставил одно из платоновских тел, после чего он предположил, что радиусы орбит каждой из планет пропорциональны радиусам соответствующих платоновских тел, если их вписать одно в другое в нужном порядке. Кеплер писал, что он исправлял нерегулярности в движении планет «до тех пор, пока они не стали соответствовать законам природы»¹²⁴.

Современному физику может показаться чудовищным, что один из основоположников современной картины мира мог предлагать столь смехотворную модель Солнечной системы. И дело не только в том, что кеплеровская схема не соответствует наблюдениям планет Солнечной системы (а это на самом деле так), но прежде всего в том, что мы знаем, что подобные спекуляции не имеют отношения к истинным законам, управляющим движениями планет. Но Кеплер не был дураком. Тот способ спекулятивного мышления, который он использовал для объяснения структуры Солнечной системы, очень напоминает способ теоретизирования современных физиков, занимающихся элементарными частицами: мы не ассоциируем что-то с платоновскими телами, но верим в то, что существует, например, соответствие между разными возможными силами в природе и разными симметриями из картановского списка всех возможных симметрий. Кеплер ошибался не тогда, когда использовал подобный способ угадывания истины, а тогда, когда считал (как и многие философы до него), что движение планет представляет собой важное явление.

Конечно, в каких-то отношениях планеты важны. На одной из них мы живем. Но существование планет не входит на фундаментальном уровне в число законов природы. Мы сегодня знаем, что планеты и их орбиты есть результат совокупности исторических случайностей, и, хотя физическая теория может предсказать, какие орбиты стабильны, а какие нет, нет никаких причин предполагать наличие специальных соотношений между радиусами этих орбит, которые отличались бы особой математической простотой и красотой.

Ожидать красивых ответов мы можем только тогда, когда изучаем поистине фундаментальные проблемы. Мы верим, что когда спрашиваем, почему мир такой, какой есть, а затем спрашиваем, почему предыдущий ответ такой, а не иной, то в конце этой цепочки объяснений мы обнаружим несколько простых принципов поразительной красоты. Мы думаем так отчасти потому, что наш исторический опыт

130

учит, что чем глубже мы проникаем в суть вещей, тем больше красоты находим. Платон и неоплатоники учили, что красота в природе есть отражение красоты высшего мира идей. Мы также считаем, что красота современных теорий есть проявление и предвестник красоты окончательной теории. В любом случае мы не признаем ни одну теорию за окончательную, если она не будет красивой.

Хотя до сих пор мы не можем точно почувствовать, когда необходимо в работе обращаться к чувству прекрасного, все же в физике элементарных частиц эстетические суждения, по-видимому, работают все лучше и лучше. Я считаю это свидетельством того, что мы движемся в правильном направлении и, может быть, находимся не так уж далеко от нашей цели.

ГЛАВА VII. Против философии

*И я когда-то к магам и святым
Ходил, познания жаждаю томим,
Я им внимал; но уходи всегда
Чрез ту же дверь, как и являлся к ним.*

Эдвард Фитцджеральд. Рубайят Омара Хайяма¹⁾

Физикам так помогают в работе субъективные и зачастую расплывчатые эстетические суждения, что можно было бы рассчитывать и на помощь со стороны философии, из которой в конце концов выросла вся наша наука. Может ли философия стать нашей путеводной нитью на пути к окончательной теории?

Ценность философии для физики в наши дни напоминает мне ценность ранних национальных государств для их народов. Не будет большим преувеличением сказать, что до введения почтовых служб главной задачей каждого национального государства было защитить свой народ от влияния других национальных государств. Точно так же взгляды философов иногда приносили пользу физикам, но главным образом в негативном смысле, защищая их от предубеждений других философов.

Я не собираюсь доказывать, что лучше всего физика развивается без всяких предубеждений. Всегда есть так много вещей, которые нужно сделать, так много общепринятых принципов, которые могут быть оспорены, что мы не могли бы двигаться вперед, не руководствуясь хоть какими-то предубеждениями. Моя мысль заключается в том, что философские принципы, вообще говоря, не обеспечивают нас правильными предубеждениями. В поисках окончательной теории физики напоминают больше собак, чем орлов: мы носимся, вынюхивая все вокруг в поисках следов красоты, которую надеемся

¹⁾ *Фитцджеральд Э. Рубайят Омара Хайяма. Поэма / Пер. О. Румера // Омар Хайям. Рубаи: Пер. с перс.-тадж. Л.: Сов. писатель, 1986. 320 с. (Б-ка поэта. Большая серия). — Прим. ред.*

132

обнаружить в законах природы, но вряд ли мы сумели бы увидеть путь к истине с вершин философии.

Конечно, у каждого физика есть какая-то рабочая философия. Для большинства из нас — это грубый, прямолинейный реализм, т. е. убежденность в объективной реальности понятий, используемых в наших научных теориях. Однако эта убежденность достигается в процессе научных исследований, а не в результате изучения философских трудов.

Все сказанное совсем не означает отрицания ценности философии, основная часть которой не имеет никакого отношения к науке¹²⁵. Более того, я не собираюсь отрицать и ценность философии науки, которая в лучших своих образцах представляется мне приятным комментарием к истории научных открытий. Но не следует ожидать, что философия науки может дать в руки современных ученых какое-то полезное руководство на тему о том, как надо работать или что желательно было бы обнаружить.

Должен признать, что это понимают и многие философы. Потратив три десятилетия на профессиональные исследования в области философии науки, философ Джордж Гейл приходит к выводу, что «все эти почти недоступные простым смертным дискуссии, замешанные на схоластике, могут интересовать только ничтожное число ученых-практиков»¹²⁶. Людвиг Витгенштейн замечает: «Ничто не кажется мне менее вероятным, чем то, что чтение моих трудов может серьезно повлиять на работу какого-то ученого или математика»¹²⁷.

Дело здесь не только в интеллектуальной лени учеников. Конечно, очень мучительно прерывать свою работу и заставлять себя выучить новую дисциплину, но, когда требуется, ученые на это способны. Что касается меня, то в разные периоды жизни я вынужден был отрывать время от своих основных занятий, чтобы выучить самые разные вещи, в которых возникала необходимость — от дифференциальной топологии до системы MS DOS. Дело все в том, что не видно, где физик может использовать знание философии, не считая тех случаев, когда изучение работ отдельных философов помогает нам избежать ошибок, совершенных другими философами.

Делая такой вывод, я должен честно признать свою ограниченность и пристрастность. Разочарование пришло после нескольких лет увлеченных занятий философией на младших курсах университета. Взгляды философов, которые я изучал, постепенно начали казаться мне расплывчатыми и непродуктивными по сравнению с поражающими воображение успехами математики и физики. С тех пор время от времени я пытался разобраться в текущей литературе по философии науки. Некоторые работы казались мне написанными на непреодолимо сложном жаргоне¹²⁸. Единственное, что оставалось думать, что цель этих работ — произвести впечатление на тех, кто путает неясность изложения с его глубиной. Некоторые же работы были

133

написаны прекрасно и представляли собой хорошее, даже глубокое чтение, к примеру сочинения Людвиг Витгенштейна или Пола Фейерабенда. Но лишь в редчайших случаях мне казалось, что это имеет хоть какое-то отношение к тем научным занятиям, которые были мне известны¹²⁹. Согласно Фейерабенду, понятие научного объяснения, разработанное рядом философов науки, столь узко, что невозможно говорить, что какая-то теория объясняется другой теорией¹³⁰. Эта точка зрения оставляет мое поколение физиков, занимающихся частицами, без работы.

Читателю (особенно, если он — профессиональный философ) может показаться, что ученый вроде меня, который настолько не в ладах с философией науки, должен деликатно обходить эту тему и предоставить право судить экспертам. Я знаю, как относятся философы к любительским философским потугам ученых. Но я стремлюсь здесь изложить точку зрения не философа, а рядового специалиста, неиспорченного работающего ученого, который не видит в профессиональной философии никакой пользы. Не я один разделяю такие взгляды — мне не известен ни один ученый, сделавший заметный вклад в развитие физики в послевоенный период, работе которого существенно помогли бы труды философов. В предыдущей главе я упоминал о том, что Вигнер назвал «непостижимой эффективностью» математики. Здесь я хочу указать на другое в равной степени удивительное явление — непостижимую неэффективность философии.

Даже если в прошлом философские доктрины и оказывали какое-то полезное воздействие на ученых, влияние этих

доктрин затягивалось на слишком долгое время, принося в конце концов тем больше проблем, чем дольше эти доктрины оставались в употреблении. Рассмотрим, например, почтенную доктрину механицизма, т. е. идею, что явления природы сводятся к соударениям и давлению материальных частиц или жидкостей. В древности трудно было придумать что-либо более прогрессивное. С того самого времени, как досократики Демокрит и Левкипп начали рассуждать об атомах, идея, что явления природы имеют механическую причину, противостояла популярным верованиям в богов и демонов. Эпикур, основоположник эллинизма, специально ввел в свою систему взглядов механистическое мировоззрение как противостояние против веры в богов-олимпийцев. Когда в 1630-е гг. Рене Декарт попробовал осуществить великую попытку объяснить мир в рамках рациональных понятий, он, естественно, должен был описывать физические силы вроде тяготения механистически, с помощью вихрей в материальной субстанции, заполняющей все пространство. «Механистическая философия» Декарта оказала сильное влияние на Ньютона, и не потому, что она была правильна (Декарту, по-видимому, не приходила в голову столь понятная в наши дни идея о количественной проверке теорий), а потому, что давала пример механической теории, которая может иметь смысл сама

134

по себе, вне зависимости от согласия с природными явлениями. Механицизм достиг пика своего развития в XIX в. после блистательных объяснений химических и тепловых явлений с помощью гипотезы об атомах. Даже в наши дни многим кажется, что механицизм есть просто логическая противоположность предрассудкам. В истории человеческой мысли механистическое мировоззрение сыграло несомненно героическую роль.

Но в этом как раз и состоит проблема. В науке, как в политике или экономике, большую опасность представляют идеи, пережившие эпоху своей полезности. Героическое прошлое механицизма так подняло его престиж, что последователям Декарта было очень трудно принять ньютоновскую теорию Солнечной системы. Как мог порядочный картезианец, уверовавший в то, что все явления природы могут быть сведены к непосредственному влиянию материальных тел или жидкостей друг на друга, принять точку зрения Ньютона, согласно которой Солнце действует на Землю с определенной силой сквозь 150 000 000 километров пустого пространства? Только в XVIII в. европейские философы начали свыкаться с идеей действия на расстоянии. В конце концов, начиная с 1720 г., ньютоновские идеи возобладали в европейских странах, сначала в Англии, а затем в Голландии, Италии, Франции и Германии¹³¹ (именно в таком порядке). Отчасти это произошло в результате влияния таких философов, как Вольтер и Кант. Но и здесь мы видим, что роль философии была негативной: она помогла освободить науку от пут самой философии.

Даже после триумфа ньютонианства механистическая традиция продолжала плодоносить в физике. Теории электрического и магнитного полей, разработанные в XIX в. Майклом Фарадеем и Джеймсом Клерком Максвеллом, были обрешены в механистическую форму и изложены с помощью понятия о напряжениях во всепроникающей физической среде, часто называемой эфиром. Физики XIX в. вели себя совсем не глупо — чтобы продвигаться вперед, любой физик нуждается в каком-то качественном мировоззрении, а механистическое мировоззрение казалось в те годы ничем не хуже других взглядов. К сожалению, это мировоззрение продержалось слишком долго.

Окончательный поворот от механицизма в электромагнитной теории произошел в 1905 г., после того как эйнштейновская специальная теория относительности отвергла эфир и заменила его пустым пространством — средой, переносящей импульсы электромагнитных волн. Но даже тогда механистический взгляд на мир довлел над физиками старшего поколения.

Кроме того, механицизм распространился за пределы науки и прижился там, принеся позднее много неприятностей ученым. В XIX в. героическая традиция механицизма была, к сожалению, включена в систему диалектического материализма Маркса и Энгельса и их последователей. Ленин, находясь в эмиграции, написал

135

в 1908 г. напыщенную книгу о материализме, и хотя для него эта книга была главным образом средством борьбы с другими революционерами, цитаты из нее стали священным писанием для его последователей, так что некоторое время диалектический материализм стоял на пути признания общей теории относительности в Советском Союзе. Еще в 1961 г. выдающийся русский физик Владимир Фок вынужден был защищать себя от нападок философов-ортодоксов. Предисловие к его монографии «Теория пространства, времени и тяготения» содержит примечательное высказывание: «Философская сторона наших взглядов на теорию пространства, времени и тяготения сформировалась под влиянием философии диалектического материализма, в частности под влиянием труда Ленина „Материализм и эмпириокритицизм“».

Но в истории науки не бывает все так просто. Хотя после трудов Эйнштейна в серьезных исследованиях по физике и не осталось места наивному механистическому мировоззрению, некоторые его элементы все же сохранились в физике первой половины XX в. С одной стороны, были обнаружены материальные частицы — электроны, протоны, нейтроны, — образующие обычное вещество. С другой стороны, были известны поля — электрическое, магнитное и гравитационное, которые порождались частицами и оказывали на них силовое воздействие. В 1929 г. физики стали склоняться к объединяющей точке зрения. Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули установили, что частицы и силы есть проявления более глубокого уровня реальности, а именно уровня квантовых полей. Несколькими годами ранее квантовая механика была применена для описания электрических и магнитных полей и подтвердила гипотезу Эйнштейна о частицах света — фотонах. Гейзенберг и Паули предположили, что не только фотоны, но все частицы являются сгустками энергии различных полей. В рамках этой *квантовой теории поля* электроны есть сгустки энергии электронного поля, нейтрино есть сгустки энергии нейтринного поля и т. д.

Несмотря на такой поразительный вывод, все же большая часть работ по взаимодействию фотонов и электронов в 30-е и 40-е гг. делалась в рамках старой дуалистичной квантовой электродинамики, где фотоны рассматривались как сгустки энергии электромагнитного поля, а электроны — просто как частицы вещества. Если ограничиться только фотонами и электронами, то квантовая теория поля приводит к тем же результатам, что и квантовая электродинамика. Но к тому времени, как я стал в 50-е гг. старшекурсником, квантовая теория поля была практически везде признана как правильная основа фундаментальной физики. В тех рецептах устройства мира, которые прописывали физики, список ингредиентов уже включал не частицы, как раньше, а лишь несколько сортов полей.

Мораль этой истории в том, что глупо думать, будто можно предвидеть даже те понятия, в рамках которых будет сформулирована будущая квантовая теория поля. Ричард Фейнман заметил однажды,

что когда журналисты спрашивают об окончательных теориях, употребляя такие понятия, как окончательный список частиц или окончательное объединение всех сил природы, мы на самом деле даже не знаем, правомочны ли такие вопросы. Непохоже, что старое наивное механистическое мировоззрение возродится вновь или мы вернемся к дуализму частиц и полей, но и квантовая теория поля — не последнее слово в науке. Есть трудности со включением гравитации в рамки квантовой теории поля. Пытаясь преодолеть их, физики сравнительно недавно предложили вариант окончательной теории, в котором сами квантовые поля есть всего лишь низкоэнергетические проявления пространственно-временных нерегулярностей, получивших название струн. Складывается впечатление, что мы не знаем правильных вопросов до тех пор, пока не приближаемся к знанию правильных ответов.

Хотя наивный механицизм, похоже, благополучно скончался, физиков продолжают тревожить другие метафизические предубеждения, особенно те, которые связаны с понятиями пространства и времени. Длительность во времени — единственное, что мы способны измерить (пусть и неточно) силой одной мысли, без участия наших чувств, поэтому естественно думать, что мы можем что-то узнать о размерности времени чисто рациональным путем. Кант учил, что пространство и время не являются частями внешней реальности, а структурами, заранее существующими в нашем мозге и позволяющими связывать между собой вещи и события. Наиболее шокирующим для правоверного кантианца в теориях Эйнштейна было то, что они низвели пространство и время до уровня обычных свойств физической вселенной, которые могут меняться из-за движения (в специальной теории относительности) или тяготения (в общей теории относительности). Даже сегодня, через сто лет после создания специальной теории относительности, некоторые физики все еще полагают, что есть вещи, которые можно сказать о пространстве и времени на основе чистого рассуждения.

Такая оголтелая метафизика вышла на поверхность особенно в дискуссиях о происхождении Вселенной. Согласно стандартной теории Большого взрыва, Вселенная возникла в состоянии бесконечно большой температуры и плотности около десяти—пятнадцати миллиардов лет тому назад. Каждый раз, когда я рассказывал о теории Большого взрыва и дело доходило до вопросов и ответов, кто-нибудь в аудитории обязательно начинал доказывать, что идея начала абсурдна: какой бы момент времени мы ни назвали началом, всегда должен быть момент перед этим. Я всегда пытался объяснить, что это необязательно должно быть так. Например, мы знаем из нашего повседневного опыта, что как бы холодно ни было, всегда может быть еще холоднее, но все-таки существует такое понятие, как абсолютный нуль температуры. Мы не можем достичь температуры ниже абсолютного нуля не потому, что недостаточно умны, а потому, что

температура ниже абсолютного нуля просто не имеет смысла. Стивен Хокинг предложил, может быть, еще лучшую аналогию: вполне имеет смысл вопрос о том, что находится севернее Остина, Кембриджа или любого другого города, но не имеет смысла вопрос о том, что находится севернее Северного полюса. Блаженный Августин в «Откровении» вступил в ставшую знаменитой схватку с этой проблемой и пришел к выводу, что вопрос о том, что было перед тем, как Бог создал Вселенную, неверен, так как Бог, сам находящийся вне времени, создал время вместе с самой Вселенной. Такой же точки зрения придерживался Моисей Маймонид.

Должен признать, что на самом деле мы не знаем, началась ли Вселенная в строго определенный момент времени в прошлом. Андрей Линде и другие космологи¹³² предложили недавно ряд приемлемых теорий, в которых наша расширяющаяся Вселенная является лишь крохотным пузырьком в бесконечно старой Мегавселенной, в которой происходит вечное рождение и размножение таких пузырьков. Я не буду здесь пытаться доказывать, что наша Вселенная несомненно имеет конечный возраст. Я хочу лишь подчеркнуть, что используя только силу чистого разума, нельзя утверждать, что такое невозможно.

Здесь мы опять даже не уверены, что задаем правильные вопросы. В новейшей версии теории струн пространство и время возникают как выводимые понятия, не содержащиеся в фундаментальных уравнениях теории. В подобных теориях пространство и время имеют ограниченный смысл: нельзя говорить о промежутке времени, который ближе к моменту Большого взрыва, чем 10^{-42} с. В обыденной жизни мы вряд ли можем заметить интервал времени в одну сотую долю секунды, так что интуитивные представления о природе пространства и времени, полученные из повседневного опыта, не имеют большой ценности при попытках понять теорию происхождения Вселенной.

Однако наибольшие затруднения причиняет современной физике не метафизика, а эпистемология, учение о природе и источниках знания. Эпистемологическая доктрина, называемая *позитивизмом* (или в некоторых трудах логическим позитивизмом), утверждает не только то, что окончательной проверкой любой теории является ее сопоставление с экспериментальными данными (с чем вряд ли кто будет спорить), но и то, что каждое понятие в наших теориях должно в каждом пункте ссылаться на наблюдаемые величины. Это означает, что хотя физические теории могут включать понятия, все еще не изученные экспериментально, и которые не будут изучены ни в этом году ни в следующем по причине дороговизны исследований, совершенно недопустимо включать в наши теории понятия и элементы, которые в принципе нельзя никогда наблюдать. На карту поставлено многое, так как если принять доктрину позитивизма, то это позволит получить ценные сведения о составных частях окончательной те-

рии, используя мысленные эксперименты для установления того, что в принципе можно наблюдать.

Фигурой, чаще всего ассоциируемой с введением позитивизма в физику, является Эрнст Мах, венский физик и философ конца XIX в. Для него позитивизм был как бы противоядием от метафизики Иммануила Канта. Эйнштейновская статья 1905 г. по специальной теории относительности несет следы очевидного влияния Маха: в ней полно наблюдателей, измеряющих расстояния и времена с помощью линеек, часов и лучей света. Позитивизм помог Эйнштейну избавиться от представления, что утверждение об одновременности двух событий имеет абсолютный смысл. Он убедился, что ни одно измерение не может дать критерий одновременности, одинаковый для всех наблюдателей. Сосредоточенность на том, что реально может быть наблюдаемо, и составляет суть позитивизма. Эйнштейн высказал Маху свою признательность: в письме к нему несколькими годами спустя он назвал себя «Ваш преданный ученик»¹³³. После Первой мировой войны позитивизм получил дальнейшее развитие в трудах Рудольфа Карнапа и членов Венского кружка философов, поставивших целью перестроить науку в соответствии с философски удовлетворительными представлениями. Они во многом преуспели в очистке науки от

метафизического хлама.

Позитивизм сыграл также важную роль при зарождении современной квантовой механики. Выдающаяся первая статья Гейзенберга 1925 г.¹³⁴ начинается с наблюдения, что «как хорошо известно, формальные правила, использованные [в работе Н. Бора в 1913 г.] для вычисления наблюдаемых величин, таких как энергия атома водорода, могут быть подвергнуты серьезной критике на том основании, что они содержат в качестве основных элементов соотношения между величинами, которых по-видимому в принципе не наблюдаемы, например положением и скоростью обращения электрона». В духе позитивизма Гейзенберг включил в свой вариант квантовой механики только наблюдаемые, например скорость, с которой атом может спонтанно совершать переход из одного состояния в другое, испуская или поглощая квант излучения. Соотношение неопределенностей, являющееся одной из фундаментальных основ вероятностной интерпретации квантовой механики, основано на сделанном Гейзенбергом позитивистском анализе ограничений, с которыми мы сталкиваемся, пытаясь одновременно наблюдать положение частицы и ее импульс.

Несмотря на ценность позитивизма для Эйнштейна и Гейзенберга, он все же принес столько же плохого, сколько хорошего. Тем не менее, в противоположность механистическому мировоззрению, позитивизм сохранил героическую ауру, так что он еще принесет много неприятностей в будущем. Джордж Гейл даже возлагает именно на позитивизм ответственность за теперешнее отчуждение между физиками и философами¹³⁵.

139

Позитивизм стал основой оппозиции атомной теории в начале XX в. В XIX в. были блистательно возрождены старые идеи Демокрита и Левкиппа о том, что все вещество состоит из атомов. Джон Дальтон, Амадео Авогадро и их последователи объяснили на основе атомной теории правила химии, свойства газов и природу теплоты. Атомная теория стала частью общепринятого языка физики и химии. Однако позитивисты во главе с Махом рассматривали это как отступление от истинных процедур научного исследования, поскольку никакая техника, которую только можно было в те времена вообразить, не позволяла наблюдать атомы непосредственно. Позитивисты декларировали, что ученые должны сосредоточиться на сообщении результатов наблюдений, например, что при соединении двух объемных частей водорода с одной объемной частью кислорода образуется водяной пар, но не должны забивать головы метафизическими рассуждениями, будто это происходит потому, что молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, так как никто не может наблюдать эти атомы или молекулы. Сам Мах так никогда и не смирился с существованием атомов. Уже в 1910 г., когда атомизм был принят практически всеми, Мах, в полемике с Планком, писал, что «если вера в реальность атомов является столь критической, тогда я отказываюсь от физического образа мышления. В этом случае я не могу оставаться физиком-профессионалом и отказываюсь от своей научной репутации»¹³⁶.

Сопrotивление атомизму имело особенно печальные последствия в случае с задержкой признания статистической механики, редукционистской теории, в которой теплота интерпретируется с помощью статистического распределения энергий частей любой системы. Развитие этой теории в трудах Максвелла, Больцмана, Гиббса и др. было одним из триумфов науки XIX в., так что отрицая ее, позитивисты совершили самую худшую из возможных ошибок, какую только может сделать ученый: не заметить успеха, когда он случается.

Позитивизм причинил неприятности и в менее известных случаях. Знаменитый опыт, поставленный Дж.Дж. Томсоном, считается большинством людей опытом по открытию электрона. (Томсон был преемником Максвелла и Рэлея в качестве Кавендишевского профессора в Кембриджском университете.) В течение ряда лет физики были озадачены таинственным явлением катодных лучей, которые испускаются, когда металлическая пластинка, помещенная в откачанную стеклянную трубку, подключается к отрицательному полюсу мощной электрической батареи. Эти лучи проявляются в виде светящегося пятна, оставляемого на противоположной стороне трубки. Кинескопы — экраны современных телевизоров — представляют собой не что иное, как катодные трубки, в которых интенсивность катодных лучей управляется сигналами, посылаемыми с телевизионных станций. Когда в XIX в. катодные лучи были впервые обнаружены, никто не знал,

140

что они собой представляют. Затем Томсон измерил, как отклоняются катодные лучи электрическим и магнитным полями, проходя внутри трубки. Оказалось, что величина отклонения траектории этих лучей от прямолинейной согласуется с гипотезой, что лучи состоят из частиц, переносящих определенную величину электрического заряда, имеющих определенную массу и совершенно одинаковое отношение величины массы к величине заряда. Поскольку масса частиц оказалась намного меньше массы атомов, Томсон пришел к выводу, что эти частицы являются фундаментальными составными частями атомов и носителями электрического заряда во всех электрических токах, будь то в атомах, катодных трубках или проводниках. За это открытие Томсон объявил себя, а затем то же повсеместно сделали и историки, открывателем новой формы материи, частицы, для которой он выбрал имя, уже бывшее в ходу в теории электролиза, а именно электрон.

Однако точно такой же опыт был сделан примерно в то же время в Берлине Вальтером Кауфманном. Главное отличие эксперимента Кауфманна от эксперимента Томсона заключалось в том, что у Кауфманна он был лучше. Как мы сегодня знаем, результат для отношения заряда электрона к его массе был у Кауфманна более точным, чем у Томсона. Но, тем не менее, Кауфманн никогда не упоминается как открыватель электрона, так как он не думал, что открыл новую частицу. Томсон работал в рамках английских традиций, восходящих к Ньютону, Дальтону и Праугу, где были приняты рассуждения об атомах и их составных частях. Кауфманн же был позитивистом¹³⁷; он не верил в то, что занятием физиков могут быть рассуждения о вещах, которые они не могут наблюдать. Поэтому Кауфманн не сообщил об открытии нового сорта частиц, а сообщил, что нечто, чем бы оно ни было, пролетая внутри катодной трубки, пронесит определенное отношение заряда к массе.

Мораль этой истории не только в том, что увлечение позитивизмом испортило карьеру Кауфманна. Томсон, увлекаемый верой в то, что он открыл фундаментальную частицу, продолжал работать и поставил несколько других экспериментов для определения свойств этой частицы. Он обнаружил свидетельства того, что частицы с тем же отношением заряда к массе испускаются при радиоактивном распаде, и провел первые измерения заряда электрона. Вместе с предыдущим измерением отношения заряда к массе, это измерение позволило установить массу электрона. Именно совокупность всех этих

экспериментов и дает право называть Томсона открывателем электрона, но он, вероятно, никогда не стал бы их делать, если бы не отнесся всерьез к идее о частице, которую в то время невозможно было непосредственно наблюдать.

В ретроспективе позитивизм Кауфманна и других оппонентов атомизма кажется не только тормозившим развитие, но и наивным. Что, в конце концов, означает, что мы что-то наблюдаем? Строго го-

141

воря, Кауфманн даже не наблюдал отклонения катодных лучей в данном магнитном поле; он всего лишь измерял изменение положения светящегося пятна на противоположной стороне вакуумной трубки, вызванного тем, что вокруг куска железа, поднесенного к трубке, была несколько раз обмотана проволока, подключенная к электрической батарее, а затем использовал принятую теорию для интерпретации увиденного в терминах траектории луча и магнитных полей. Если быть совсем точным, он не делал и этого; на самом деле, он использовал определенные зрительные и тактильные ощущения, которые затем интерпретировал как светящиеся пятна, проволоку и батарею. Уже давно среди историков науки стало общепринятым, что никакое наблюдение не может быть свободным от теории¹³⁸.

Считается, что окончательная капитуляция антиатомизма произошла в 1908 г. после заявления химика Вильгельма Оствальда в очередном издании его «Очерков общей химии»: «Теперь я убежден, что недавно мы получили экспериментальные свидетельства дискретной или зернистой структуры вещества, которые тщетно искали приверженцы атомной гипотезы в течение сотен и тысяч лет». Те экспериментальные свидетельства, которые имел в виду Оствальд, заключались в измерениях молекулярного вклада в так называемом броуновском движении крохотных частиц, взвешенных в жидкости, а также в измерении Томсоном заряда электрона. Если теперь осознать, насколько перегружены теорией все экспериментальные данные, то становится очевидным, что еще в XIX в. все успехи атомной теории в химии и статистической механике подтверждали наблюдение атомов.

Гейзенберг отмечал, что сам Эйнштейн пересмотрел свое отношение к позитивизму, осязаемому в начальной формулировке теории относительности. В прочитанной в 1974 г. лекции Гейзенберг вспоминает беседу с Эйнштейном в Берлине в начале 1926 г.:

«Я заметил Эйнштейну, что мы на самом деле не можем наблюдать такую траекторию [электрона в атоме]; реально мы наблюдаем лишь частоты света, испущенного атомом, интенсивности и вероятности переходов, а не сами траектории. Поскольку кажется рациональным вводить в теорию только такие величины, которые могут быть непосредственно обнаружены, понятие траекторий электрона не должно фигурировать в теории. К моему изумлению, этот аргумент совершенно не убедил Эйнштейна. Он полагал, что всякая теория содержит на самом деле ненаблюдаемые величины. Принцип использования только наблюдаемых величин просто невозможно непротиворечиво соблюсти. И когда я возразил на это, что я просто использую ту же философию, что и он при формулировке основ специальной теории относительности, Эйнштейн ответил на это: „Может быть, раньше я и пользовался этой философией, и даже писал так, но все равно это глупость“»¹³⁹.

Еще раньше, в парижской лекции 1922 г., Эйнштейн отозвался о Махе как о «хорошем механике», но «жалком философе»¹⁴⁰.

142

Несмотря на победу атомизма и отречение Эйнштейна тема позитивизма время от времени всплывает в физике XX в. Позитивистская сосредоточенность на наблюдаемых типа координат и импульсов частиц стояла на пути «реалистической» интерпретации квантовой механики, в которой волновая функция представляет физическую реальность. Позитивизм также внес лепту в запутывание проблемы бесконечностей. Как мы видели, Оппенгеймер в 1930 г. заметил, что теория фотонов и электронов, известная как квантовая электродинамика, приводит к абсурдному результату, что испускание или поглощение фотонов электронами в атоме придает ему бесконечную энергию. Проблема бесконечностей беспокоила теоретиков в 30-е и 40-е гг., и в результате было высказано общее предположение, что квантовая электродинамика просто становится неприменимой для электронов и фотонов очень больших энергий. Значительная доля этого страха перед квантовой электродинамикой была связана с позитивистским ощущением вины: некоторые теоретики боялись, что говоря о значениях электрического и магнитного полей в той точке пространства, где находится электрон, они совершают грех, вводя в физику принципиально ненаблюдаемые элементы. Это было верно, но только тормозило открытие реального решения проблемы бесконечностей, заключающееся в том, что они сокращаются, если позаботиться об аккуратном определении массы и заряда электрона.

Позитивизм сыграл также ключевую роль в борьбе против квантовой теории поля, которую вел в 1960 г. в Беркли Джеффри Чу. Для Чу главным объектом в физике была *S*-матрица, таблица, в клетках которой стоят вероятности всех возможных результатов для всех возможных процессов соударения частиц. *S*-матрица содержит в себе все, что можно реально наблюдать, изучая реакции с любым числом частиц. Теория *S*-матрицы восходит к работам Гейзенберга и Джона Уилера в 30-х и 40-х гг. (*S* происходит от первой буквы немецкого слова *Streuung*, т. е. рассеяние), но Чу и его сотрудники использовали новые идеи относительно того, как вычислять *S*-матрицу без введения каких бы то ни было ненаблюдаемых элементов вроде квантовых полей. В конце концов эта программа провалилась¹⁴¹, отчасти потому, что просто оказалось слишком сложно вычислять *S*-матрицу таким способом. Но прежде всего провал был обусловлен тем, что путь прогресса в понимании слабых и сильных ядерных сил оказался связанным с теми самыми квантовыми теориями полей, которые Чу пытался отвергнуть.

Однако самое драматическое отрицание принципов позитивизма связано с развитием современной теории кварков. В начале 60-х гг. Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг независимо попытались упростить невероятно сложный зоопарк частиц, известных к тому времени. Они предположили, что почти все эти частицы состоят из нескольких простых (и еще более элементарных) частиц, которые Гелл-Манн назвал *кварками*. Поначалу эта идея казалась совершенно не выходя-

143

щей за рамки обычного для физиков способа мышления — в конце концов, это был еще один шаг по пути, указанном еще Левкиппом и Демокритом и заключающемся в том, чтобы объяснять сложные структуры с помощью более простых меньших по размеру составляющих. Картина кварков была применена в 60-е гг. к огромному количеству физических задач,

связанных с протонами, нейтронами, мезонами и другими частицами, предположительно состоящими из кварков, и во всех случаях привела к хорошим результатам. Однако все попытки экспериментаторов в 60-е и начале 70-х гг. вытащить кварки из тех частиц, в которых они предположительно содержатся, полностью провалились. Это выглядело ненормально. Еще с тех пор, как Томсон вырвал электроны из атомов в катодно-лучевой трубке, всегда удавалось разбить любую составную систему вроде молекулы, атома или ядра на отдельные частицы, из которых она состоит. Почему же было невозможно выделить свободные кварки?

Картина кварков обрела смысл с развитием в начале 70-х гг. квантовой хромодинамики, современной теории сильных ядерных сил, в рамках которой запрещен любой процесс, в котором может быть выделен свободный кварк. Прорыв произошел в 1973 г., после того, как независимые вычисления Дэвида Гросса и Фрэнка Вильчека из Принстона и Дэвида Политцера из Гарварда показали, что квантовые теории определенного типа¹⁴² обладают удивительным свойством «асимптотической свободы»: все силы, действующие между частицами, уменьшаются с ростом энергии!¹⁴³ Как раз такое уменьшение сил и наблюдалось еще в 1967 г. в опытах по рассеянию частиц при высоких энергиях¹⁴⁴, но в 1973 г. впервые было показано, что могут существовать теории, в которых силы ведут себя подобным образом. Этот успех быстро привел к тому, что одна из таких квантовых теорий поля — теория кварков и глюонов, получившая название *квантовой хромодинамики*, была признана правильной теорией сильных взаимодействий.

Первоначально считалось, что в процессах соударения элементарных частиц нельзя наблюдать глюоны, так как они очень тяжелые, и попросту не хватает энергии для рождения частиц столь большой массы. Вскоре после открытия явления асимптотической свободы некоторые теоретики предположили¹⁴⁵, что глюоны наоборот вообще не имеют массы, как фотоны. Если это так, то факт ненаблюдения глюонов и кварков в свободном состоянии можно объяснить тем, что обмен безмассовыми глюонами между кварками и самими глюонами порождает дальнедействующие силы, не позволяющие в принципе оторвать кварки или глюоны друг от друга. Сейчас принято считать¹⁴⁶, что если вы попытаетесь разбить на составные части, например, мезон (частицу, состоящую из кварка и антикварка), то требующаяся для этого сила возрастает при удалении кварка и антикварка все дальше друг от друга, до тех пор пока в конце концов вам

144

не потребуется затрачивать на это разъединение такое количество энергии, которого будет достаточно для рождения новой кварк-антикварковой пары. В результате родившийся из вакуума антикварк подсоединяется к первоначальному кварку, а кварк из вакуума — к антикварку, так что вместо свободных кварка и антикварка вы получаете две кварк-антикварковых пары, т. е. опять два мезона. Часто используется такой образ: разделение кварков напоминает попытку разделить два конца куска упругой струны. Вы тянете, тянете струну, так что в конце концов, когда прилагаемое вами усилие станет достаточным, струна рвется, но при этом вы все равно не получаете два изолированных конца струны, а получаете две струны поменьше с двумя концами у каждой. Гипотеза, что кварки и глюоны никогда нельзя в принципе наблюдать изолированно друг от друга, стала частью общепринятой системы взглядов в современной физике элементарных частиц¹⁴⁷, и тем не менее это нисколько не мешает нам описывать протоны, нейтроны и мезоны состоящими из кварков. Мне трудно представить что-либо, что вызвало бы большее отвращение у Эрнста Маха.

Теория кварков была лишь одной ступенью в непрерывном процессе переформулировки физической теории с помощью понятий, все более фундаментальных и, одновременно, все более далеких от повседневного опыта. Как же можно рассчитывать создать теорию, основанную только на наблюдаемых величинах, если ни одно из привычных нам понятий, возможно, что даже такие понятия, как пространство и время, не входят в число фундаментальных понятий наших теорий? Мне кажется совершенно невероятным, что позитивистский подход может быть полезным в будущем.

Метафизика и эпистемология по крайней мере старались играть конструктивную роль в науке. Не так давно наука подверглась атаке со стороны недружественных комментаторов, объединившихся под знаменем релятивизма. Философы-релятивисты отрицают стремление науки к открытию объективной истины¹⁴⁸; они рассматривают ее всего лишь как еще одно социальное явление, не более фундаментальное, чем культ плодородия или шаманство.

Философский релятивизм частично уходит корнями в сделанное философами и историками науки открытие, что в процессе признания научных идей очень много субъективизма. Мы уже обсуждали ту роль, которую играют эстетические суждения в признании или отрицании новых физических теорий. Для ученых все это давно известно (хотя философы и историки науки пишут иногда так, как будто мы слышим об этом в первый раз). В знаменитой книге «Структура научных революций»¹⁴⁹ Томас Кун сделал следующий шаг и попытался доказать, что во время научных революций те понятия (или *парадигмы*), с помощью которых ученые оценивают теории, сами меняются, так что новые теории просто нельзя судить по дореволюционным стандартам. Многое в книге Куна полностью соответствует

145

моему собственному опыту в науке. Но в последней главе Кун упорно атаковал ту точку зрения, что развитие науки приближает нас к объективной истине: «Мы можем, точнее говоря, должны отказаться от представления, явного или неявного, что изменения парадигмы приближают ученых и их последователей все ближе и ближе к истине». Позднее книга Куна, кажется, стала читаться (или, по крайней мере, цитироваться) как манифест общей атаки на предполагаемую объективность научного знания.

Кроме того, начиная с работы Роберта Мертона, в 30-е гг. усилилась тенденция со стороны антропологов и социологов рассматривать занятия наукой (или, по крайней мере, наукой, отличной от социологии и антропологии) теми же методами, которые используются для исследования других социальных явлений. Конечно, наука *является* социальным явлением, со своей системой ценностей, снобистскими замашками, интересными методами совместной деятельности и подчинения. Так, Шарон Тревик провела годы в обществе экспериментаторов, занимавшихся физикой элементарных частиц, в Стэнфордском ускорительном центре и лаборатории КЕК в Японии и описала то, что она видела, с точки зрения антрополога. Эта ветвь большой науки является естественным полем для изучения антропологами и социологами, так как ученые, с одной стороны, придерживаются древней традиции, поощряющей личную инициативу, и, с другой стороны, вынуждены при проведении современных экспериментов работать вместе в командах, насытивая сотни человек. Как теоретику мне не приходилось работать в подобных группах, но многие другие наблюдения Тревик, содержат, по-моему, много верного, например:

«Физики рассматривают себя членами элитарной группы, членство в которой определяется только личными научными заслугами. При этом предполагается, что все имели честный старт. Принадлежность к группе подчеркивается крайней непринужденностью в одежде, одинаковым видом кабинетов и обращением друг к другу по именам. Индивидуализм и соревнование считаются допустимыми и эффективными: иерархия в сообществе строится как меритократия²⁾, производящая хорошую физику. Однако американские физики подчеркивают, что наука недемократична: решения, касающиеся целей научной деятельности, не должны приниматься большинством голосов сообщества и не должно быть равного доступа для всех к ресурсам лабораторий. Большинство японских физиков придерживаются по этим пунктам противоположного мнения...»¹⁵⁰

Во время подобных исследований антропологи и социологи обнаружили, что даже процесс изменений в научной теории является общественным делом. В одном из недавних обзоров отмечалось, что

²⁾ Меритократия — общество, иерархия членов которого определяется только личными заслугами каждого в определенной области. — *Прим. перев.*

146

«научные истины, по существу, являются широко цитируемыми общественными соглашениями относительно того, что представляет собой „действительность“, возникающими в результате „научного процесса“ переговоров». Наблюдения за учеными в процессе работы позволили французскому философу Бруно Латуру и английскому социологу Стиву Булгару заметить, что «переговоры относительно того, что считать доказательством, или что является хорошим экспериментом, столь же беспорядочны, как и любой спор между судейскими или политиками».

Казалось бы, остается всего лишь один шаг от этих полезных исторических и социологических наблюдений до радикальной точки зрения, что конкретное содержание общепринятых научных теорий определяется общественной и исторической обстановкой, в которой данная теория развивалась. (Развитие именно такой точки зрения иногда называют программой-максимум социологии науки.) Эта атака на объективность научного знания проявилась даже в заголовке книги Эндрю Пикеринга «Создание кварков»¹⁵². В заключительной главе он приходит к выводу: «Если учесть огромную тренировку физиков, занимающихся элементарными частицами, в применении сложной математической техники, то преобладание математики в их описании реальности не сложнее объяснить, чем пристрастие народа к своему родному языку. Точка зрения, которая отстаивается в этой главе, заключается в том, что при развитии взглядов на окружающий нас мир никто не обязан принимать во внимание то, что говорит наука двадцатого века». Пикеринг детально описывает большие изменения в направлении развития экспериментальной физики высоких энергий, произошедшие в конце 60-х — начале 70-х гг. Вместо здравого подхода (термин Пикеринга), заключавшегося в том, чтобы сосредоточить усилия на самых заметных явлениях в столкновениях частиц высоких энергий (например, фрагментация частиц на большое число других частиц, летящих в основном в направлении первичного пучка), экспериментаторы начали проводить предложенные теоретиками опыты по поиску редких событий, например таких, когда какая-то частица большой энергии летит после соударения под большим углом к направлению первичного пучка.

Действительно, в физике высоких энергий в те годы произошла смена приоритетов, во многом правильно описанная Пикерингом, но она диктовалась исторической миссией физики. Протон состоит из трех кварков, окруженных облаком непрерывно возникающих и исчезающих глюонов и кварк-антикварковых пар. В большинстве соударений между протонами энергия начальных частиц уходит на общее перемешивание этих облаков, напоминающее результат столкновения двух грузовиков с мусором. Такие соударения крайне интересны, но они слишком сложны, так что современная теория кварков и глюонов не позволяет нам рассчитать их результаты. Таким

147

образом, они неинтересны с точки зрения проверки этой теории. Однако изредка кварк или глюон в одном из протонов испытывает лобовое соударение с кварком или глюоном из другого, так что их энергии оказывается достаточно на то, чтобы выбить кварк или глюон большой энергии из области соударения. Вероятность этого процесса мы можем вычислить. В подобном соударении могут рождаться и новые частицы, например W и Z — переносчики слабых ядерных сил. Их изучение необходимо для лучшего понимания объединения слабых и электромагнитных взаимодействий. Именно для детектирования таких редких событий и планируются сегодня все эксперименты. И все же Пикеринг, который, насколько я могу судить, понимает теоретическое обоснование этих действий очень хорошо, продолжает описывать смену акцентов в физике высоких энергий просто как смену моды¹⁵³!, вроде перехода от импрессионизма к кубизму или от коротких юбок к длинным.

Переход от очевидного наблюдения, что наука является социальным явлением, к выводу, что окончательный продукт науки — наши теории — такие, какие они есть, из-за воздействия общественных или исторических сил, представляется просто логической ошибкой. Группа альпинистов может долго спорить о лучшем маршруте на вершину, причем эти споры могут быть связаны с историческими причинами и социальным составом группы, но в конце концов хороший маршрут либо бывает найден, либо нет, и когда альпинисты взбираются на вершину, они могут точно ответить на этот вопрос. (Никто не издаст книгу об альпинизме с названием «Создание Эвереста».) Я не могу доказать, что с наукой все обстоит точно так же, но весь мой опыт ученого говорит об этом. «Переговоры» об изменениях в научных теориях продолжаются, ученые снова и снова меняют свою точку зрения в ответ на вычисления и эксперименты, пока тот или иной взгляд не обнаруживает несомненные следы объективного успеха. Я определенно чувствую, что мы обнаруживаем в физике что-то реальное, нечто, существующее независимо от тех социальных и исторических условий, которые позволили нам это открыть.

Где же тогда истоки безудержной атаки на объективность научного знания? Думаю, что один из источников — старое пугало позитивизма, на этот раз используемое для изучения самой науки. Если кто-то отказывается обсуждать то, что непосредственно не наблюдается, тогда и нельзя серьезно относиться к квантовым теориям полей, принципам симметрии или, вообще, к законам природы. То, что *могут* наблюдать философы, социологи и антропологи, — это реальное поведение живых ученых, а такое поведение никогда не удастся описать с помощью общих законов. Напротив, желанной, хотя и ускользающей целью ученых является прямая проверка научных теорий, и, когда это удастся, ученые убеждаются в реальности этих теорий.

148

Возможна и другая причина атаки на реализм и объективность науки, значительно менее возвышенная. Представьте, что вы — антрополог, изучающий культ грузовых самолетов на одном из островов Тихого океана. Островитяне верят, что они могут приманить грузовой самолет, доставлявший им во время Второй мировой войны кучу замечательных вещей, обеспечивших их процветание. Для этого они сооружают деревянные постройки, имитирующие радарные установки и радиоантенны. Вполне соответствовало бы природе человека, если бы этот антрополог и другие социологи и антропологи в аналогичных обстоятельствах чувствовали бы свое превосходство. Ведь в противоположность объектам их изучения они-то знали бы, что эти верования не основаны на объективной реальности — никакой C-47 с грузом не привлечет деревянными радарными. Так разве было бы удивительно, если бы антропологи и социологи, обратившись к исследованию работы ученых, попытались бы воссоздать этот восхитительный дух превосходства, отрицая объективную реальность научных открытий?

Релятивизм — это только одна из сторон более широкой и радикальной атаки на саму науку¹⁵⁴. Фейерабенд призвал к формальному отделению науки от общества!¹⁵⁵, вроде отделения церкви от государства, считая, что «наука есть просто одна из многих идеологий, движущих общество вперед, и так ее и следует рассматривать». Философ Сандра Хардинг пишет, что «физика, химия, математика и логика несут на себе следы их конкретных создателей не меньше, чем антропология или история»¹⁵⁶. Теодор Рожак настаивает, что мы должны изменить «фундаментальное ощущение научного мышления... даже если для этого придется решительно пересмотреть профессиональный характер науки и ее место в нашей культуре»¹⁵⁷.

Похоже, что все эти радикальные критики науки мало влияют, если вообще влияют, на самих ученых. Мне неизвестен ни один работающий ученый, который воспринимает этих философов всерьез¹⁵⁸. Та опасность, которую они несут науке, связана с их возможным влиянием на тех, кто сам не участвует в научной деятельности, но от кого мы все зависим, особенно на тех, кто финансирует науку, а также на новое поколение ученых. Недавно журнал *Nature* процитировал британского правительственного чиновника¹⁵⁹, занимающегося вопросами гражданской науки и одобрительно отзывавшегося о книге Брайана Эппльярда¹⁶⁰, в которой обосновывается тезис, что наука враждебна человеческому духу.

Я подозреваю, что близок к истине Джеральд Холтон, который рассматривает решительную атаку на науку как один из симптомов более широкой враждебности к западной цивилизации, ожесточившей сердца многих западных интеллектуалов, начиная с Освальда Шпенглера¹⁶¹. Современная наука является очевидной мишенью: ведь многие цивилизации породили великие произведения искусства

149

и литературы, но со времен Галилея научные исследования практически полностью определяются Западом.

Мне кажется, что совершается трагическая ошибка и эта враждебность направлена не в ту сторону. Даже самые чудовищные применения западной науки, например ядерное оружие, представляют всего лишь еще один пример бесчисленных попыток человечества разрушить само себя, каким бы оружием это не совершалось. Кладя на другую чашу весов все мирные применения науки и ее роль в освобождении человеческого духа, я все же считаю, что современная наука, наряду с демократией и законами контрапункта в музыке, есть подарок Запада миру и мы вправе этим гордиться.

В конце концов это различие исчезнет. Современные знания и научные методы быстро проникали в другие страны, не принадлежащие западному миру, например в Индию и Японию. Я предвижу день, когда наука перестанет ассоциироваться с Западом и станет общим достоянием человечества.

ГЛАВА VIII. Блюзы XX века

Блюзы,
Блюзы двадцатого века,
Как они удручают меня.
Кто
Спасется от утомительных
Блюзов двадцатого века.

Ноэль Кауард. Кавалькада

Как бы далеко мы не углубились в рассмотрение цепочки вопросов о материи и силах, действующих в природе, все ответы сводятся к стандартной модели элементарных частиц. На каждой конференции по физике высоких энергий, начиная с конца 70-х гг., экспериментаторы докладывают о все большей точности совпадения результатов опытов с предсказаниями этой модели. Казалось бы, что физики, занимающиеся высокими энергиями, должны испытывать чувство удовлетворения. Но почему же тогда мы находимся в состоянии уныния, как будто под влиянием меланхолического блюза?

Прежде всего, стандартная модель описывает электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия, но оставляет в стороне четвертую силу, а в действительности, первую из всех, ставших известными человеку, — силу тяготения. Такой пропуск — не просто результат забывчивости: как мы увидим, при попытке описывать гравитацию на том же языке, который мы используем в стандартной модели для описания других взаимодействий, т. е. на языке квантовой теории поля, возникают непреодолимые математические трудности. Во-вторых, хотя сильные ядерные взаимодействия и *включены* в стандартную модель, они все-таки выглядят не составной частью единой картины, а стоят особняком от электромагнитных и слабых взаимодействий. В-третьих, хотя электромагнитные и слабые взаимодействия и рассматриваются в рамках стандартной модели единым образом, между этими взаимодействиями существуют очевидные различия (например, в обычных условиях слабые ядерные силы во много раз меньше

151

электромагнитных сил). У физиков есть общие представления о том, как возникает различие между электромагнитными и слабыми взаимодействиями, но все же мы не до конца понимаем причины этого различия. Наконец, даже если отвлечься от проблемы объединения четырех сил природы, все равно в самой стандартной модели есть множество свойств, которые не вытекают из фундаментальных принципов (как бы нам хотелось), а просто берутся из эксперимента. Среди свойств, кажущихся произвольными, — список частиц, существующих в рамках модели, число параметров, таких как отношения масс частиц, и даже сами симметрии. Можно без труда представить себе модель, в которой одно из этих свойств или все сразу будут иными, чем в стандартной модели.

Конечно, стандартная модель явилась огромным шагом вперед по сравнению с путаницей приближенных симметрий, плохо сформулированных динамических предположений и голых фактов, которую изучали в институте физики моего поколения. Но очевидно, что стандартная модель не является окончательным ответом, и чтобы выйти за ее пределы, нужно понять все ее недостатки.

Тем или иным образом все проблемы стандартной модели упираются в явление, названное *спонтанным нарушением симметрии*. Открытие этого явления, сначала в физике твердого тела, а затем и в физике частиц, стало одним из великих достижений науки XX в. Главный успех был достигнут в объяснении различий между слабыми и электромагнитными взаимодействиями, поэтому для объяснения явления спонтанного нарушения симметрии лучше всего начать с электрослабой теории.

Эта теория является частью стандартной модели, имеющей дело со слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Она основана на точном принципе симметрии, утверждающем, что законы природы не меняют своей формы, если заменить поля электронов и нейтрино на смешанные поля, например, взять одно поле, состоящее на 70% из нейтрино и на 30 % из электрона, и другое поле, состоящее на 30 % из нейтрино и 70 % из электрона. При этом одновременно необходимо в тех же пропорциях перемешать поля других семейств частиц, например, кварков *u* и *d*. Такой принцип симметрии называется локальным, поскольку предполагается, что законы природы остаются неизменными, даже если смесь полей будет меняться со временем или от точки к точке в пространстве. Но есть и другое семейство частиц, существование которого *диктуется* указанным принципом симметрии, примерно таким же образом, как существование гравитационного поля диктуется симметрией между разными координатными системами. Это семейство состоит из фотона и частиц *W*, *Z*, причем эти поля также должны перемешиваться друг с другом, если мы перемешиваем поля электронов и нейтрино и поля кварков. Обмен фотонами обуславливает электромагнитные силы, а обмен частицами *W* и *Z* ме-

152

нерирует слабые ядерные силы, так что симметрия между электроном и нейтрино является также симметрией между электромагнитными и слабыми ядерными силами.

Однако подобная симметрия определенно отсутствует в окружающей нас природе, и поэтому-то ее так долго не могли открыть. Например, электроны и частицы *W*, *Z* обладают массами¹⁶²!, а нейтрино и фотоны не имеют массы. (Слабые силы во много раз слабее электромагнитных именно благодаря большой массе *W*, *Z*.) Иными словами, симметрия, связывающая электроны, нейтрино и другие частицы, есть свойство основных уравнений стандартной модели, определяющих свойства элементарных частиц, но в то же время, эта симметрия не выполняется для *решений* этих уравнений, т. е. для свойств самих частиц.

Чтобы понять, как это возможно, чтобы уравнения имели симметрию, а решения — нет, предположим, что наши уравнения полностью симметричны относительно двух типов частиц (например, *u*-, *v*-кварков), и мы хотим найти решения этих уравнений, определяющие массы обеих частиц. Можно было бы предположить, что симметрия между двумя типами кварков приведет к тому, что и их массы окажутся одинаковыми, но это не единственная возможность¹⁶³. Симметрия уравнений не исключает возможности того, что решение будет давать массу *u*-кварка больше, чем масса *d*-кварка, но при этом обязательно должно существовать *второе* решение уравнений, дающее массу *d*-кварка на столько же большую массы

u-кварка. Таким образом, симметрия уравнений необязательно должна отражаться в симметрии каждого отдельно взятого решения этих уравнений, а лишь во *всей* совокупности решений. В этом простом примере реальные свойства кварков будут соответствовать одному или другому решению, демонстрируя нарушение симметрии исходной теории. Заметим, что на самом деле безразлично, какое из двух решений реализуется в природе, если единственной разницей между кварками *u* и *d* является разница в их массах, тогда разница между двумя решениями будет соответствовать тому, какой из кварков мы назовем *u*, а какой *d*. Природа, как мы ее знаем, соответствует одному решению всех уравнений стандартной модели, при этом безразлично *какому*, если только все решения связаны точными принципами симметрии.

В подобных случаях говорят, что симметрия нарушена, хотя лучше было бы говорить, что симметрия *«спрятана»*, так как уравнения продолжают обладать симметрией, и именно уравнения определяют свойства частиц. Описанное явление называется *спонтанным нарушением симметрии*, так как ничто не нарушает симметрию уравнений теории, а нарушение симметрии возникает спонтанно в различных решениях уравнений.

Красота наших теорий во многом определяется принципами симметрии. Именно поэтому первые работы по спонтанному нарушению

153

симметрии в начале 60-х гг. вызвали столь большой резонанс. Перед нами вдруг открылось, что в законах природы есть значительно больше симметрии, чем это кажется на основе анализа свойств элементарных частиц. Нарушенная симметрия — вполне платоновское понятие: та реальность, которую мы наблюдаем в наших лабораториях есть лишь искаженное отражение более глубокой и более красивой реальности уравнений, отображающих все симметрии теории.

Обычный постоянный магнит является хорошим реалистичным примером нарушенной симметрии. (Этот пример особенно подходит потому, что идея спонтанного нарушения симметрии появилась впервые в квантовой физике в 1928 г., в построенной Гейзенбергом теории постоянного магнетизма.) Уравнения, определяющие поведение атомов железа и магнитное поле в магните, нагретом до очень высокой температуры (скажем, 800° С), обладают точной симметрией по отношению ко всем направлениям в пространстве: ничто в этих уравнениях не отличает север от юга или восток от запада. Однако если кусок железа охладить ниже 770° С, он внезапно приобретает определенным образом направленное магнитное поле¹⁶⁴, нарушая тем самым симметрию между направлениями. Расе крохотных существ, родившихся и проживших всю жизнь внутри постоянного магнита, потребовалось бы много времени на то, чтобы осознать, что истинные законы природы обладают полной симметрией относительно разных направлений в пространстве, и выделенное направление возникает только потому, что спины атомов железа спонтанно выстраиваются в одну сторону, создавая магнитное поле.

Подобно существам внутри магнита, мы недавно обнаружили симметрию, которая нарушается в *нашей* Вселенной. Эта симметрия связывает слабые и электромагнитные силы¹⁶⁵, а ее нарушение проявляется, например, в разнице между безмассовым фотоном и очень тяжелыми частицами *W* и *Z*. Большая разница между нарушением симметрии в стандартной модели и в магните заключается в том, что происхождение намагниченности хорошо известно. Она возникает за счет известных сил взаимодействия между соседними атомами железа, стремящимися выстроить свои спины параллельно друг другу. Стандартная модель гораздо менее изучена. Ни одна из известных сил, входящих в стандартную модель, недостаточно велика, чтобы принять на себя ответственность за нарушение симметрии между слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Главное, чего мы все еще не знаем о стандартной модели, — это что является причиной нарушения электрослабой симметрии.

В первоначальной версии стандартной теории слабых и электромагнитных взаимодействий нарушение симметрии между этими взаимодействиями было приписано новому полю, специально для этой цели введенному в теорию. Как и магнитное поле в обычном постоянном магните, это поле может спонтанно поворачиваться, указывая

154

некоторое направление, правда, не в обычном пространстве, а на воображаемом циферблате, направление стрелок на котором отличает электроны от нейтрино, фотоны от частиц *W*, *Z* и т. п. То значение поля, при котором нарушается симметрия, принято называть *вакуумным значением*, так как поле принимает это значение в пустоте, в области вдали от воздействия других частиц. После четверти века исследований мы так и не знаем, верна ли такая простая картина спонтанного нарушения симметрии, но пока эта картина остается наиболее приемлемым объяснением.

Не первый раз, желая удовлетворить некоторым требованиям теории, физики предполагают существование новых полей. В начале 30-х гг. беспокойство ученых вызывал закон сохранения энергии в процессе бета-распада радиоактивных ядер. В 1930 г., для того чтобы восстановить баланс энергии, казалось бы, бесследно теряемой в этом процессе, Вольфганг Паули предположил, что существует частица с подходящими свойствами, названная им нейтрино, которая и уносит недостающую энергию. Трудноуловимое нейтрино было в конце концов экспериментально обнаружено¹⁶⁶ более чем два десятилетия спустя. Утверждать существование чего-то, что еще никогда не наблюдалось, — дело рискованное, но иногда приносящее успех.

Как и другие поля в квантово-механической теории, это новое поле, ответственное за нарушение симметрии электрослабых взаимодействий, должно переносить энергию и импульс в виде сгустков или квантов. Электрослабая теория утверждает, что, по крайней мере, один из этих квантов должен наблюдаться как новая элементарная частица. За несколько лет до того, как Салам и я разработали теорию объединения слабых и электромагнитных сил, основанную на идее спонтанного нарушения симметрии, ряд теоретиков дал математическое описание простых примеров подобного нарушения симметрии¹⁶⁷. Особенно ясно это удалось сделать в 1964 г. Питеру Хиггсу из Эдинбургского университета. Поэтому новую частицу, с необходимостью возникшую в первоначальной версии электрослабой теории, назвали *хиггсовской частицей*.

Никто еще не обнаружил хиггсовскую частицу, но это не противоречит теории: хиггсовская частица и не могла бы быть обнаружена в сделанных до сих пор экспериментах, если ее масса больше пятидесяти масс протона, что вполне возможно. (К сожалению, электрослабая теория молчит в отношении точного значения массы хиггсовской частицы, только ограничивая ее значение сверху числом в один триллион электрон-вольт, т. е. в тысячу раз больше массы протона.) Необходимы новые эксперименты, чтобы проверить, действительно ли существует хиггсовская частица, а может, и несколько таких частиц с отличающимися свойствами, и установить их массы.

Важность этих проблем выходит за рамки вопроса о характере нарушения электрослабой симметрии. Теория электрослабых взаи-

155

модействий дала нам понимание того, что все частицы стандартной модели, за исключением хиггсовских частиц, приобретают свои массы за счет нарушения симметрии между слабыми и электромагнитными силами. Если бы мы могли каким-то способом выключить это нарушение симметрии, то электрон, частицы W , Z и все кварки стали бы безмассовыми, как фотон или нейтрино. Поэтому загадка происхождения масс элементарных частиц есть часть проблемы понимания механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии. В первоначальной версии стандартной модели хиггсовская частица — единственная, масса которой непосредственно входит в уравнения теории, нарушение электрослабой симметрии придает всем другим частицам массы, пропорциональные массе хиггсовской частицы. Но у нас нет уверенности, что все обстоит так просто.

Выяснение механизма нарушения электрослабой симметрии важно не только в физике, но и при попытках понять раннюю историю нашей Вселенной. Так же, как можно уничтожить всякую намагниченность куска железа и восстановить симметрию между различными направлениями, всего лишь нагрев этот кусок выше 770°C , так же и симметрию между слабыми и электромагнитными силами можно восстановить, подняв температуру в лаборатории до нескольких миллионов триллионов (10^{15}) градусов (порядка 100 ГэВ в энергетических единицах). При таких температурах симметрия будет уже не скрытой, а будет явно проявляться в свойствах всех частиц стандартной модели. (Например, при таких температурах электроны, W , Z и все кварки станут безмассовыми.) Подобные температуры порядка 10^{15} К невозможно создать в лаборатории, их даже не найти в центре самых горячих звезд. Но в соответствии с простейшей версией общепринятой космологической теории Большого взрыва примерно $10\text{—}20$ миллиардов лет тому назад существовал момент, когда температура Вселенной была бесконечно велика. Примерно через 10^{-10} с после этого начального момента температура Вселенной упала до 10^{15} К , и с этого времени нарушилась симметрия между слабыми и электромагнитными силами.

Скорее всего, это нарушение симметрии не произошло одномоментно и везде одинаково. В более знакомых нам примерах «фазовых переходов», скажем, замерзании воды или намагничивании куска железа, переход может произойти в одном месте чуть раньше или чуть позже, чем в другом, и происходить в разных местах чуть по-разному, что видно, например, при образовании отдельных маленьких кристалликов льда или магнитных доменов с разными направлениями намагниченности. Такого рода усложнения при электрослабом фазовом переходе могут привести к разным наблюдаемым эффектам, например, повлиять на распространенность легких элементов, созданных несколькими минутами спустя. Однако понять это невозможно, пока не понят сам механизм нарушения электрослабой симметрии.

156

Нарушение симметрии между слабыми и электромагнитными взаимодействиями действительно существует, так как теория, основанная на этом принципе, *действует*, т. е. позволяет сделать много успешных предсказаний о свойствах частиц W и Z и о переносимых ими силах. Но мы не можем быть до конца уверены, что электрослабая симметрия нарушается вакуумной величиной какого-то поля, введенного в теорию, или что хиггсовская частица реально существует. Что-то обязательно должно быть включено в электрослабую теорию, чтобы нарушить симметрию, но вполне возможно, что это нарушение обусловлено непрямым воздействием каких-то сверхсильных взаимодействий нового типа¹⁶⁸, которые не действуют на обычные кварки или электроны и нейтрино, и поэтому еще не обнаружены. Подобные теории были развиты еще в конце 70-х гг.¹⁶⁹, но в них возникают свои проблемы. Задача строящихся сверхмощных ускорителей — разрешить эту загадку.

На этом история спонтанного нарушения симметрии не кончается. Эта идея сыграла свою роль при попытке объединить в рамках единой схемы слабые и электромагнитные взаимодействия с третьим — сильным ядерным взаимодействием. Стандартная модель объясняет очевидное различие между электромагнитными и слабыми взаимодействиями как результат спонтанного нарушения симметрии. Но это, очевидно, не так в отношении сильных взаимодействий. Даже на уровне уравнений стандартной модели не существует симметрии, связывающей сильные ядерные силы с электромагнитными и слабыми силами. Начиная с 70-х гг., не прекращаются поиски теории, обобщающей стандартную модель, в которой как сильные, так и электрослабые взаимодействия были бы объединены одной более широкой и спонтанно нарушенной группой симметрии¹⁷⁰.

Есть очевидное возражение против всякой подобной попытки объединения взаимодействий. В рамках любой теории поля интенсивность взаимодействия зависит от числовых параметров двух типов: от масс (если они есть) частиц типа W , Z , переносящих взаимодействие, и определенных чисел, называемых константами связи или *константами взаимодействия* и характеризующих вероятность испускания и поглощения частиц, подобных фотонам, глюонам, W и Z , в ядерных реакциях. Массы возникают в результате спонтанного нарушения симметрии, но константы взаимодействия — это числа, входящие в исходные уравнения теории. Любая симметрия, связывающая сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия, даже после спонтанного нарушения будет приводить к точному равенству всех констант взаимодействия, т. е. к равенству интенсивностей сильных и электрослабых взаимодействий (если должным образом определить способ их сравнения). Кажущиеся различия между интенсивностями нужно будет тогда приписать спонтанному нарушению симметрии, приводящему к разнице в массах частиц-переносчиков

157

взаимодействия, в полной аналогии с тем, как в стандартной модели разница между электромагнитными и слабыми силами обусловлена нарушением электрослабой симметрии, в результате которого у частиц W и Z получаются очень большие массы, а фотон остается безмассовым. Но ясно, что интенсивности сильных ядерных и электромагнитных взаимодействий не *равны* друг другу — сильные взаимодействия, как это следует из самого их названия, намного сильнее электромагнитных, даже несмотря на то, что оба этих взаимодействия переносятся безмассовыми частицами, глюонами и фотонами.

В 1974 г. возникла идея, как преодолеть указанное препятствие¹⁷¹. На самом деле, константы взаимодействия всех типов зависят, хотя и очень слабо, от энергий процессов, в которых эти константы измеряются. В любой теории, объединяющей

сильные и электрослабые взаимодействия, указанные константы взаимодействия должны быть обязательно равны друг другу при *определенной* энергии, однако значение этой энергии может существенно отличаться от тех значений, которые доступны в современных экспериментах. В стандартную модель входят три независимые константы взаимодействия (это одна из причин, по которой мы не удовлетворены этой моделью как окончательной теорией), так что само требование, что существует *какая-то* энергия, при которой все эти константы должны сравниваться по величине, является весьма нетривиальным. Накладывая это условие, можно предсказать одну связь между константами при энергиях существующих ускорителей¹⁷², и это предсказание находится в разумном согласии с опытами. Хотя это всего лишь одно успешное количественное предсказание, но отсюда следует ободряющий вывод, что в этих идеях что-то есть.

Таким же способом можно оценить и ту энергию, при которой все константы взаимодействия становятся равными по величине. При энергиях современных ускорителей сильное взаимодействие намного превосходит по интенсивности все другие силы и, согласно квантовой хромодинамике, убывает с ростом энергии очень слабо. Поэтому предсказывается, что та энергия, при которой все взаимодействия в стандартной модели станут одинаково сильными, должна быть очень большой, порядка 10^{24} эВ = 10^{15} ГэВ (вычисления, сделанные в последнее время, приводят, скорее, к значению 10^{16} ГэВ). Если действительно существует спонтанно нарушенная симметрия, объединяющая сильные и электрослабые взаимодействия, то должны существовать и новые тяжелые частицы, входящие наряду с *W*, *Z*, фотонами и глюонами в число переносчиков взаимодействия. Тогда энергия 10^{15} ГэВ должна соответствовать массе этих новых сверхтяжелых частиц. Как будет видно ниже, в современных теориях суперструн не требуется предполагать существование отдельной новой симметрии, связывающей сильные и электрослабые взаимодействия, но константы этих взаимодействий сравниваются при той же энергии 10^{16} ГэВ.

158

Может показаться, что это всего лишь очередное недостижимо большое число, но когда в 1974 г. была получена эта оценка, в головах физиков-теоретиков зазвучали колокола. Мы все знали о существовании другой очень большой энергии, естественно возникающей в любой теории, пытающейся объединить гравитацию с остальными силами в природе. При обычных условиях сила тяготения намного меньше, чем силы, порождаемые сильными, электромагнитными или слабыми взаимодействиями. Никто никогда не наблюдал никакого влияния силы тяготения на процессы, происходящие между частицами на уровне отдельных атомов или молекул, да и мало надежды на то, что это когда-нибудь станет возможным. (Единственная причина, по которой тяготение кажется достаточно большой силой в нашей повседневной жизни, связана с тем, что Земля состоит из очень большого числа атомов, каждый из которых вносит свой крохотный вклад в поле тяготения на поверхности Земли.) Однако согласно общей теории относительности все эффекты тяготения связаны не только с массой, но и с энергией. Именно поэтому фотоны, у которых нет массы, но которые имеют энергию, отклоняются гравитационным полем Солнца. При достаточно больших энергиях сила тяготения между двумя типичными элементарными частицами становится столь же большой, как и любая другая действующая между ними сила. Та энергия, при которой это происходит, составляет примерно 10^{19} ГэВ. Ее называют планковской энергией¹⁾.

Поразительно, что планковская энергия всего лишь примерно в сто раз больше той энергии, при которой становятся равными константы сильного и электрослабого взаимодействий, несмотря на то, что и та и другая энергии неизмеримо превосходят энергии, обычно используемые в физике частиц. То, что эти две огромные энергии относительно столь близки, является серьезным доводом в пользу того, что нарушение любой симметрии, объединяющей сильные и электрослабые взаимодействия, — всего лишь часть более фундаментального нарушения той симметрии, которая объединяет гравитацию с другими силами в природе. Возможно, не существует отдельной единой теории сильных и электрослабых взаимодействий, а существует действительно единая теория гравитационных, сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий²⁾.

К сожалению, гравитация осталась в стороне от стандартной модели, и причина этого в необычайной трудности описания гравитации

¹⁾ В 1899 г. Макс Планк заметил, что существует естественная единица измерения энергии, построенная из мировых констант — скорости света, квантовой постоянной (позднее названной именем Планка) и ньютоновской постоянной тяготения, входящей в известную формулу для силы тяготения, действующей между двумя массами.

²⁾ Такую теорию в англоязычной литературе называют TOE (по первым буквам английских слов *Theory Of Everything*), а по-русски иногда переводят как *Теория Всего Сущего* (ТВС). — Прим. перев.

159

на языке квантовой теории поля. Можно, конечно, просто применить правила квантовой механики к уравнениям поля тяготения в общей теории относительности, но мы тут же сталкиваемся со старой проблемой бесконечностей. Например, если мы попытаемся вычислить вероятность того, что произойдет при столкновении двух гравитонов (частиц, являющихся квантами гравитационного поля), мы получим вполне заметный вклад в эту вероятность от процесса обмена одним гравитоном между сталкивающимися гравитонами. Но стоит только продолжить вычисления и учесть обмен двумя гравитонами, сразу же получаются бесконечные вероятности. Эти бесконечности можно устранить, если изменить уравнения Эйнштейна для гравитационного поля, добавив в них новое слагаемое с бесконечным постоянным множителем и подобрав его так, чтобы он сократил первую бесконечность. Но если теперь включить в вычисления процесс с обменом *тремя* гравитонами, то мы получим новые бесконечности, которые удастся сократить только добавлением новых бесконечных слагаемых в уравнения, и т.д., пока мы не придем к теории с неограниченно большим числом неизвестных констант. Подобные теории могут быть реально полезными при расчете процессов при низких энергиях, когда новые слагаемые в уравнениях поля пренебрежимо малы, но эти теории теряют всякую предсказательную силу, если пытаться применять их к гравитационным явлениям при планковских энергиях. На сегодняшний день расчеты физических процессов при планковских энергиях нам просто не под силу.

Конечно, никто и не изучает экспериментально процессы при планковских энергиях (и к тому же не исследует на опыте какие-либо квантовые гравитационные процессы, вроде гравитон-гравитонного рассеяния при любых энергиях), но для того, чтобы теория могла рассматриваться как удовлетворительная, она не только должна согласовываться с результатами уже проделанных экспериментов, но должна давать разумные предсказания и для тех экспериментов, которые в принципе могут

быть выполнены. В этом отношении общая теория относительности многие годы была в том же положении, что и теория слабых взаимодействий в конце 60-х гг., — она прекрасно согласовывалась с теми экспериментами, которые можно было осуществить, но содержала внутренние противоречия, показывавшие, что теория нуждается в модификации.

Значение планковской энергии ставит перед нами еще одну труднейшую проблему. Дело не в том, что эта энергия так велика — она возникла в физике на таком глубоком уровне, что можно просто допустить, что планковская энергия есть характерная единица энергии, входящая в уравнения будущей окончательной теории. Загадка заключается в том, почему *все другие энергии так малы*? В частности, в первоначальной версии стандартной модели массы электрона, W , Z и всех кварков пропорциональны единственной массе, входя-

160

щей в уравнения теории, — массе хиггсовской частицы. Из того, что мы знаем о массах W и Z , можно вывести, что энергия, соответствующая массе хиггсовской частицы, не может превышать 1 000 ГэВ. Но это всего лишь 10^{-16} планковской энергии. Это означает также, что существует иерархия симметрий: какая бы симметрия не объединяла гравитационные и сильные взаимодействия с электрослабыми взаимодействиями, она должна нарушаться в 10^{16} раз сильнее, чем симметрия, объединяющая электромагнитные и слабые взаимодействия. Загадка объяснения чудовищной разницы в величине фундаментальных энергий в современной физике элементарных частиц носит название *проблемы иерархии*.

Более пятнадцати лет проблема иерархии стоит как кость в горле теоретической физики. Побудительным мотивом многих теоретических спекуляций последнего времени была необходимость ее решения. Подчеркнем, что здесь нет парадокса — в конце концов, почему бы какой-то энергии в фундаментальных уравнениях физики и не быть в 10^{16} раз меньше, чем другой, — но здесь есть тайна. Именно поэтому проблема так трудна. Парадокс, как убийство в запертой комнате, может иметь свое объяснение, но тайна принуждает нас искать ключи к ней вне рамок самой проблемы.

Один из подходов к решению проблемы иерархии основан на идее симметрии нового типа, названной *суперсимметрией*¹⁷³, которая объединяет в новые «*суперсемейства*» частицы с разным значением спина. В суперсимметричных теориях есть несколько хиггсовских частиц, но симметрия запрещает появление каких-либо масс хиггсовских частиц в фундаментальных уравнениях теории!¹⁷⁴ То, что мы называем массами хиггсовских частиц в стандартной модели, должно возникнуть в результате сложных динамических эффектов, связанных с нарушением суперсимметрии. В другом подходе¹⁷⁵, упоминавшемся выше, высказывается идея, что нарушение электрослабой симметрии происходит не за счет вакуумного среднего некоторого поля, а в результате какого-то сверхсильного взаимодействия.

К сожалению, до сих пор нет ни малейших признаков существования в природе суперсимметрии или каких-то сверхсильных взаимодействий¹⁷⁶. Конечно, это не может являться решающим аргументом против названных идей — новые частицы, предсказываемые в этих теориях для решения проблемы иерархии, могут оказаться слишком тяжелыми, чтобы быть рожденными на существующих ускорителях.

Мы ожидаем, что хиггсовские частицы или другие новые частицы, существование которых требуется в разных моделях решения проблемы иерархии, будут открыты на достаточно мощных новых ускорителях типа Сверхпроводящего суперколлайдера. Но нет ни малейших шансов, что любой ускоритель, какой мы только можем вообразить, сумеет ускорить отдельные частицы до тех чудовищно

161

больших энергий, при которых объединяются все силы. Когда Демокрит и Левкипп обсуждали идею об атомах, они и вообразить не могли, что эти атомы в миллионы раз меньше, чем песчинки на берегу Эгейского моря, или что пройдет 2 300 лет прежде, чем будут получены доказательства существования атомов. Наши рассуждения подвели нас к берегу во много раз более широкого пролива: мы полагаем, что все силы природы объединяются при энергиях порядка планковской энергии, которая в 10^{15} раз больше самой большой энергии, доступной сегодняшним ускорителям.

Открытие этого колоссального пролива оказало на физику влияние, далеко выходящее за рамки проблемы иерархии. С одной стороны, возникло новое понимание старой проблемы бесконечностей. В стандартной модели, как и в старой доброй квантовой электродинамике, испускание и поглощение фотонов и других частиц неограниченно больших энергий приводило к бесконечно большим вкладам в энергию атома и другие наблюдаемые величины. Чтобы разобраться с этими бесконечностями, потребовалось, чтобы стандартная модель обладала особым свойством перенормируемости, заключающемся в том, что все бесконечности в теории должны сокращаться с другими бесконечностями, возникающими в определениях голых масс и других констант, входящих в уравнения теории. Это условие было очень существенным подспорьем при построении стандартной модели — только теории с простейшими из возможных уравнениями являются перенормируемыми. Но поскольку стандартная модель не включает гравитацию, мы полагаем сейчас, что она есть только низкоэнергетическое приближение к действительно фундаментальной единой теории, теряющее применимость при энергиях, близких к планковской. Почему же тогда надо серьезно относиться к тому, какие предсказания дает эта теория относительно испускания и поглощения частиц неограниченно больших энергий? А раз это не имеет значения, то зачем тогда требовать перенормируемости стандартной модели? Проблема бесконечностей остается с нами, но это проблема будущей окончательной теории, а не ее низкоэнергетического приближения вроде стандартной модели.

В результате такого переосмысления проблемы бесконечностей, мы полагаем сейчас, что полевые уравнения стандартной модели не относятся к очень простому перенормируемому типу, а содержат на самом деле все мыслимые слагаемые, совместимые с симметриями теории. Но тогда нам следует объяснить, почему старые перенормируемые квантовые теории поля, вроде простейших версий квантовой электродинамики или стандартной модели работают так хорошо. Мы думаем, что причина этого коренится в том, что все члены в уравнениях поля, за исключением перенормируемых, обязательно возникают в этих уравнениях поделенными на какую-то степень величины порядка планковской энергии. Поэтому вклад таких слагаемых в любой

162

наблюдаемый физический процесс будет пропорционален степени отношения энергии процесса к планковской энергии, т. е. величине порядка 10^{-15} . Это такое крохотное число, что естественно, все такие эффекты невозможно наблюдать. Иными словами, условие перенормируемости, являвшееся путеводной нитью всех наших размышлений от квантовой

электродинамики в 40-х гг. до стандартной модели в 60-х и 70-х гг., было правильным с точки зрения практических целей, хотя причины, по которым требовалось выполнение этого условия, кажутся сейчас уже не имеющими отношения к делу.

Это изменение точки зрения имеет потенциально далеко идущие последствия. В простейшей перенормируемой версии стандартной модели возникают некоторые «случайные» законы сохранения помимо реальных фундаментальных законов сохранения, вытекающих из симметрий специальной теории относительности и внутренних симметрий, определяющих существование фотона, W , Z и глюонов. Среди этих случайных законов сохранения присутствуют закон сохранения кваркового числа (равного разности полного числа кварков и антикварков) и лептонного числа (равного разности полного числа электронов, нейтрино и аналогичных частиц и полного числа соответствующих античастиц). Если выписать все возможные слагаемые в уравнениях поля, которые совместимы с фундаментальными симметриями стандартной модели и условием перенормируемости, обнаруживается, что в уравнениях поля не появляется слагаемого, которое может привести к нарушению указанных дополнительных законов сохранения. Именно законы сохранения лептонного и кваркового числа не допускают существование процессов типа распада трех кварков в позитрон и фотон, т. е. эти законы сохранения обеспечивают стабильность обычной материи. Однако сейчас мы полагаем, что сложные перенормируемые слагаемые в уравнениях поля, приводящие к нарушению законов сохранения лептонного, и кваркового чисел, все же есть, но они очень малы. Эти малые слагаемые в уравнениях поля индуцируют распад протона (например, на позитрон и фотон или какую-нибудь другую нейтральную частицу), но время жизни протона относительно такого распада очень велико, порядка 10^{32} лет или чуть меньше или больше. Это число лет совпадает с числом протонов в 100 тоннах воды, так что, если предсказание верно, то в среднем за один год в 100 тоннах воды должен распасться один протон. Поиски такого распада протона безуспешно ведутся уже много лет, но скоро должна войти в строй установка в Японии, где в 10 000 тонн воды будут тщательно искать вспышки света, сигнализирующие о распаде протона. Может быть, этот опыт что-нибудь прояснит.

Между тем, появились интригующие гипотезы о возможном нарушении закона сохранения лептонного числа. В стандартной модели этот закон сохранения ответственен за то, чтобы нейтрино были

163

безмассовыми, но если этот закон нарушается, то можно ожидать, что у нейтрино есть маленькие массы порядка 10^{-5} эВ (т. е. порядка одной миллионной массы электрона). Эта масса намного меньше той, которую могли обнаружить любые лабораторные эксперименты, проведенные до настоящего времени, но тем не менее, ее наличие может приводить к тонкому эффекту, позволяющему нейтрино электронного типа (т. е. принадлежащего к тому же семейству, что и электрон) медленно превращаться в нейтрино других типов. Это могло бы объяснить давнишнюю загадку нехватки тех нейтрино, которые приходят к нам от Солнца, по сравнению с теоретическими ожиданиями¹⁷⁷. Нейтрино, образующиеся в ядре Солнца, принадлежат в основном к электронному типу, и детекторы, используемые на Земле для регистрации солнечных нейтрино, чувствительны только к нейтрино электронного типа, так что нехватка электронных нейтрино¹⁷⁸ может объясняться тем, что по пути от Солнца часть этих нейтрино превращается в нейтрино других типов. Эксперименты по проверке этой идеи проводятся с помощью разных детекторов в Южной Дакоте, Японии, Италии, Канаде и на Кавказе³⁾.

Если нам повезет, то будут обнаружены свидетельства распада протона или наличия массы у нейтрино. Возможно, что на существующих ускорителях, например на протон-антипротонном коллайдере в Фермилабе или на электрон-позитронном коллайдере в ЦЕРНе, найдут свидетельства существования суперсимметрии. Но все это происходит ужасающе медленно. Заключение доклады на всех конференциях по физике элементарных частиц за последние десять лет содержали один и тот же список пожеланий для экспериментаторов. Все это страшно далеко от действительно вселявших вдохновение прошлых лет, когда каждый месяц студенты-старшекурсники метались по коридорам физического факультета, рассказывая очередную новость о важном открытии. Только благодаря фундаментальной важности физики элементарных частиц, яркие студенты все еще приходят заниматься областью науки, в которой почти ничего не происходит.

Мы уверены, что это положение изменится, если будет завершено строительство ССК. Планировалось, что его энергия и интенсивность пучка будут достаточными, чтобы решить вопрос о механизме нарушения электрослабой симметрии, либо в результате открытия одной или более хиггсовских частиц, либо в результате обнаружения следов новых сильных взаимодействий. Если ответом на проблему иерархии является суперсимметрия, то и она может быть обнаружена на ССК. С другой стороны, если новые сильные взаимодействия будут найдены, это сразу повлечет за собой обнаружение на ССК большого

³⁾ В 2002 г. установлено, что по дороге от Солнца электронные нейтрино частично превращаются в нейтрино мюонного типа (эффект нейтринных осцилляций), т. е. у нейтрино действительно имеется очень маленькая масса. — Прим. перев.

164

количества новых частиц с массами порядка 1 000 ГэВ, которые нужно будет исследовать прежде, чем мы сможем высказать предположение, что же происходит при еще больших энергиях, когда объединяются все силы, включая гравитацию. В любом случае, физика частиц вновь двинется вперед. Битва физиков, занимающихся частицами, за строительство ССК была вызвана убеждением, что только данные, полученные на новом ускорителе, вселят в нас уверенность, что наша работа будет продолжаться.

ГЛАВА IX. Контуры окончательной теории

...Если

Вы можете глядеть в посев времен

И знаете судьбу зерна любого,

Скажите мне...

В. Шекспир. Макбет¹⁾. Акт I, сцена 3

Вполне возможно, что нас отделяют века от окончательной теории, и она окажется совершенно непохожей на то, что мы способны сегодня вообразить. Но допустим на мгновение, что эта теория совсем близко, за углом. Что мы можем в этом случае сказать о ней на основании уже известных нам знаний?

Один из разделов современной физики, который, по моему мнению, сохранится неизменным в окончательной теории — квантовая механика. Дело не только в том, что квантовая механика является основой всех наших представлений о материи и разных взаимодействиях и прошла невиданно жесткую экспериментальную проверку; более важно то, что никому не удалось придумать способ хоть как-нибудь изменить квантовую механику, который сохранил бы все ее достоинства, но не привел бы к логическим противоречиям.

Хотя квантовая механика является как бы сценой, на которой разыгрываются все явления природы, сама по себе эта сцена пуста. Квантовая механика позволяет вообразить бесчисленное множество возможных физических систем: систем, состоящих из частиц любого сорта и взаимодействующих самым разным образом, и даже систем, вообще не состоящих из частиц. История физики в XX в. отмечена все возрастающим пониманием того, что актеров в драме, разыгрывающейся на квантовой сцене, определяют принципы симметрии. Современная стандартная модель сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий основана на симметриях, а именно

¹⁾ Перевод Анны Радловой.

166

на пространственно-временных симметриях специальной теории относительности, которые требуют, чтобы стандартная модель была сформулирована на языке теории полей, и на внутренних симметриях, требующих существования электромагнитного и других полей, переносящих взаимодействия. Тяготение тоже можно понять с помощью принципов симметрии, заложенных в эйнштейновскую общую теорию относительности и утверждающих, что законы природы не должны меняться в результате любых возможных изменений нашего описания событий в пространстве и времени.

На основании векового опыта общепризнано, что окончательная теория должна покоиться на принципах симметрии. Мы ожидаем, что эти симметрии объединят тяготение со слабыми, электромагнитными и сильными взаимодействиями стандартной модели. Но за прошедшие десятилетия мы так и не узнали, каковы эти симметрии, и не сумели построить удовлетворительной квантовой теории гравитации, включающей симметрии общей теории относительности.

Возможно, мы близки к переменам. За последнее десятилетие бурно развивался радикально новый подход к квантовой теории гравитации, а может быть, и ко всему остальному, — теория струн. Эта теория является первым приемлемым кандидатом на окончательную теорию.

Корни теории струн восходят к 1968 г., когда теоретики пытались понять, как устроены сильные взаимодействия, не обращаясь к квантовой теории полей, не пользовавшейся тогда популярностью. Молодой теоретик из ЦЕРНа Габриэле Венециано сумел просто угадать формулу, определявшую вероятности рассеяния двух частиц на разные углы при разных энергиях и обладавшую некоторыми общими свойствами, которые вытекали из принципов теории относительности и квантовой механики. Используя известные математические приемы, которые в свое время проходит каждый студент-физик, он сумел построить поразительно простую формулу, удовлетворявшую всем необходимым условиям. Формула Венециано привлекла всеобщее внимание. Вскоре другие теоретики обобщили ее и положили в основу систематической приближенной схемы. В те годы никто и не помышлял о возможном применении этих идей к квантовой теории тяготения. Вся работа мотивировалась надеждой лучше понять сильные ядерные взаимодействия. (До создания правильной теории сильных взаимодействий — квантовой теории поля, известной под названием квантовая хромодинамика, оставалось еще несколько лет.)

В процессе работы стало ясно!¹⁷⁹, что формула Венециано и ее расширения и обобщения — не просто удачные догадки, а теория физических сущностей нового типа, получивших название релятивистских квантово-механических *струн*. Конечно, обычные струны состоят из частиц — протонов, нейтронов, электронов. Но новые струны совсем другие: предполагается, что протоны и нейтроны состоят

167

из них. Дело обстояло не так, будто на кого-то сошло вдохновение и он догадался, что материя построена из струн, а затем начал строить соответствующую теорию; на самом деле теория струн была построена *до того*, как кто-то понял, что это такое.

Струны можно представить себе как крохотные одномерные разрезы на гладкой ткани пространства. Струны могут быть открытыми, с двумя свободными концами, или замкнутыми, как резиновая лента. Пролетая в пространстве, струны вибрируют. Каждая из струн может находиться в любом из бесконечного числа возможных состояний (*мод*) колебаний, похожих на обертоны, возникающие при колебаниях камертона или скрипичной струны. Со временем колебания скрипичной струны затухают, так как энергия этих колебаний переходит в энергию случайного движения атомов, из которых скрипичная струна состоит, т. е. в энергию теплового движения. Напротив, струны, о которых сейчас идет речь, поистине фундаментальные составные части материи, и могут продолжать колебаться бесконечно долго. Они не состоят из атомов или чего-то в этом роде, поэтому энергии их колебаний не во что переходить¹⁸⁰.

Предполагается, что струны очень малы, так что если разглядывать их с достаточно больших расстояний, они кажутся точечными частицами. Так как струна может находиться в любой из бесконечно большого числа возможных мод колебаний, она выглядит как частица, которая может принадлежать к одному из бесконечно большого числа возможных сортов,

соответствующих определенной моде колебаний струны.

Первые варианты теории струн¹⁸¹ были не свободны от трудностей. Вычисления показывали, что среди бесконечно большого числа мод колебаний замкнутой струны существует одна мода, в которой струна выглядит как частица с нулевой массой и спином, вдвое большим, чем у фотона¹⁸². Напомним, что развитие теории струн началось с попытки Венециано понять сильные ядерные взаимодействия, так что первоначально эта теория рассматривалась как адекватное описание сильного взаимодействия и участвующих в нем частиц. Неизвестна ни одна частица такой массы и с таким спином, принимающая участие в сильных взаимодействиях, более того, мы полагаем, что если бы такая частица существовала, она должна была бы быть давно обнаружена, так что налицо серьезное противоречие с экспериментом.

Но все дело в том, что частица с нулевой массой и спином, вдвое большим, чем у фотона, *существует*. Но это не частица, принимающая участие в сильных взаимодействиях, это гравитон, квант гравитационного излучения. Более того, с 60-х гг. было известно, что любая теория, в которой присутствует частица такого спина и такой массы, должна выглядеть более или менее похоже на общую теорию относительности¹⁸³. Та безмассовая частица, которая была

168

теоретически обнаружена в ранних версиях теории струн, отличалась от истинного гравитона только в одном важном пункте — обмен этой новой частицей должен был порождать силы, напоминавшие гравитационные, но только в 10^{29} раз более сильные.

Как часто бывает в физике, теоретики, занимавшиеся струнами, нашли правильное решение неправильно поставленной задачи. В начале 80-х гг. теоретики все больше и больше стали приходить к убеждению, что новые безмассовые частицы, возникшие как математическое следствие уравнений струнных теорий, являются не сильновзаимодействующим аналогом гравитона, а самым настоящим гравитоном¹⁸⁴. Чтобы при этом гравитационное взаимодействие имело правильную интенсивность, нужно было увеличить коэффициент натяжения струн в основных уравнениях теории до такой степени, чтобы разность энергий между наинизшим и следующим по величине энергетическими состояниями струны составляла не пустячную величину порядка нескольких сот миллионов эВ, характерную для ядерных явлений, а величину порядка планковской энергии 10^{19} ГэВ, когда гравитационное взаимодействие становится столь же сильным как и другие взаимодействия. Эта энергия так велика, что все частицы стандартной модели — кварки, глюоны, фотоны — должны быть сопоставлены с наинизшими модами колебаний струны, в противном случае, требовалось бы так много энергии на то, чтобы их породить, что мы никогда не смогли бы эти частицы обнаружить.

С этой точки зрения квантовая теория поля типа стандартной модели представляет собой низкоэнергетическое приближение к фундаментальной теории, которая является совсем не теорией полей, а теорией струн. Сейчас мы полагаем, что квантовые теории полей работают столь успешно при энергиях, доступных современным ускорителям, совсем не потому, что окончательное описание природы возможно на языке квантовой теории поля, а потому, что *любая* теория, удовлетворяющая требованиям квантовой механики и специальной теории относительности, при достаточно малых энергиях выглядит как квантовая теория поля. Мы все больше и больше воспринимаем стандартную модель как *эффективную квантовую теорию*, причем прилагательное «эффективная» служит для напоминания, что все такие теории суть лишь низкоэнергетические приближения к совершенно другой теории, возможно, теории струн. Стандартная модель — сердцевина современной физики, но такое изменение отношения к квантовой теории поля может означать начало новой эры постмодерна.

Так как теории струн включают в себя гравитоны и еще кучу других частиц, впервые возникает основа для построения возможной окончательной теории. Действительно, поскольку представляется, что наличие гравитона — неизбежное свойство любой теории струн, можно сказать, что такая теория объясняет существование гравитации. Эдвард Виттен, ставший позднее ведущим специалистом по теории

169

струн, узнал об этой стороне теории в 1982 г. из обзорной статьи теоретика Джона Шварца. Он вспоминает, что эта мысль стала *«величайшим интеллектуальным потрясением в моей жизни»*¹⁸⁵.

Похоже, что теории струн сумели решить и проблему бесконечностей, сводившую на нет все предыдущие попытки построения квантовой теории тяготения. Хотя струны и выглядят как точечные частицы, все же главное в них то, что они *не являются* точечными. Можно убедиться, что бесконечности в обычных квантовых теориях поля непосредственно связаны с тем, что поля описывают точечные частицы. (Например, закон обратных квадратов для силы взаимодействия точечных электронов приводит к бесконечной величине силы, если поместить оба электрона в одну точку.) С другой стороны, должны образом сформулированная теория струн, похоже, вообще свободна от бесконечностей¹⁸⁶!

Интерес к теориям струн реально возник в 1984 г., после того, как Джон Шварц вместе с Майклом Грином показали, что две конкретные теории струн прошли проверку на математическую непротиворечивость (что не удавалось доказать в ранее изучавшихся струнных теориях)¹⁸⁷. Наиболее волнующим свойством теорий, рассмотренных Грином и Шварцем, было то, что они обладали определенной жесткостью, той самой, которую мы хотели бы видеть в окончательной теории. Хотя можно было представить себе огромное количество разных теорий открытых струн, оказалось, что только две из них имеют смысл с математической точки зрения. Энтузиазм в отношении теорий струн достиг уровня лихорадки, когда одна группа теоретиков¹⁸⁸ показала, что низкоэнергетический предел двух теорий Грина—Шварца необычайно напоминает нашу сегодняшнюю модель слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий, а другая группа (ее прозвали «Принстонский струнный квартет»¹⁸⁹) обнаружила ряд струнных теорий, еще более соответствующих стандартной модели. Многим теоретикам показалось, что удалось ухватить окончательную теорию.

С тех пор энтузиазм несколько поостыл. Сейчас ясно, что существуют тысячи теорий струн, столь же математически состоятельных, как и первые две теории Грина—Шварца. Все эти теории удовлетворяют некоторой фундаментальной симметрии, известной как *конформная симметрия*. Такая симметрия возникает не из наблюдений природных явлений, как, скажем, эйнштейновский принцип относительности. Напротив, конформная симметрия представляется необходимой¹⁹⁰, чтобы гарантировать совместимость теорий струн с квантовой механикой. С этой точки зрения, тысячи разных теорий струн просто представляют разные способы удовлетворить требованиям конформной симметрии. Широко распространено мнение,

что все эти разные теории струн на самом деле не разные, а лишь представляют различные способы решения уравнений одной и той же

170

лежащей в основе всего теории. Но мы в этом не уверены, и никто не знает, какой могла бы быть такая теория.

Каждая из тысяч отдельных теорий струн обладает своей пространственно-временной симметрией. Некоторые из этих теорий удовлетворяют принципу относительности Эйнштейна, в других теориях мы не можем даже различить что-то, напоминающее обычное трехмерное пространство. Кроме того, каждая теория струн обладает своими внутренними симметриями того же общего типа, как и внутренние симметрии, лежащие в основе сегодняшней стандартной модели слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий. Но главное отличие теорий струн от всех более ранних теорий заключается в том, что пространственно-временные и внутренние симметрии не задаются в теории струн руками, а являются математическими следствиями конкретного способа, которым законы квантовой механики (а следовательно, требование конформной симметрии) удовлетворяются в каждой конкретной теории струн. Поэтому теории струн потенциально представляют собой важный шаг вперед в рациональном объяснении природы. Кроме того, они, по-видимому, являются наиболее глубокими, математически непротиворечивыми теориями, совместимыми с принципами квантовой механики, и в частности, единственными такими теориями, включающими что-то, похожее на тяготение.

Довольно много современных молодых физиков-теоретиков работают над развитием теории струн. Получено несколько вдохновляющих результатов. Например, оказалось, что в рамках теории струн естественно получается равенство констант взаимодействия сильных и электрослабых взаимодействий при очень больших энергиях, определяемых через натяжение струны, хотя и нет отдельной симметрии, объединяющей эти взаимодействия. Тем не менее, до сих пор не удается получить детальные количественные предсказания, позволяющие осуществить решающую проверку теории струн.

Этот тупик привел к печальному расколу физического сообщества. Теория струн предъявляет к исследователю большие требования. Очень мало теоретиков, работающих над другими проблемами, имеют достаточный запас знаний, чтобы понять технические детали в статьях по теории струн. В то же время, мало кто из специалистов по теории струн имеет время на изучение других разделов физики, особенно экспериментальной физики высоких энергий. Реакцией многих моих коллег на эту невеселую ситуацию явилась определенная враждебность по отношению к теории струн. Я не разделяю этих чувств. Теория струн представляется на сегодняшний день единственным кандидатом на окончательную теорию — как же, в таком случае, можно надеяться, что многие блестящие молодые теоретики *откажутся* от работы над этой теорией? Конечно, жалко, что теория пока что оказалась не слишком успешной, но, как и все остальные ученые, специалисты по струнам прилагают максимум усилий, что-

171

бы преодолеть очень трудный период в истории физики. Мы просто обязаны надеяться на то, что либо теория струн приведет к более осязаемым результатам, либо новые эксперименты приведут к прогрессу в других направлениях.

К сожалению, никто еще не сумел построить конкретную теорию струн, включающую все пространственно-временные и внутренние симметрии и тот набор кварков и лептонов, который наблюдается в природе. Более того, мы даже до сих пор не знаем, как перечислить все возможные теории струн или узнать их свойства. Для решения этих проблем, похоже, нужно разработать новые методы вычислений, далеко выходящие за рамки тех методов, которые так хорошо работали в прошлом. Например, в квантовой электродинамике мы можем рассчитать эффект обмена двумя фотонами между электронами в атоме как малую поправку к эффекту обмена одним фотоном, а затем рассчитать эффект обмена тремя фотонами как еще меньшую поправку и т.д., прекратив это вычисление, как только оставшиеся поправки станут пренебрежимо малы. Такой метод вычислений называется теорией возмущений. Однако главные проблемы теории струн связаны с обменом бесконечным количеством струн, так что их нельзя решить методом теории возмущений.

Дела обстоят еще хуже. Даже если бы мы знали, как математически обращаться с теориями струн, и смогли бы найти какую-то одну из этих теорий, соответствующую наблюдаемым в природе явлениям, все равно у нас нет сегодня критерия того, почему *именно эта* теория струн применима к реальному миру. Я снова повторяю — цель физики на ее самом фундаментальном уровне заключается не только в том, чтобы описать мир, но и объяснить, почему он таков, каков он есть.

В поисках критерия, который позволит нам выбрать правильную теорию струн, нам, может быть, придется привлечь принцип, имеющий несколько сомнительный статус в физике. Его называют *антропным принципом*, и он утверждает, что законы природы должны разрешать существование разумных существ, которые могут задавать вопросы об этих законах.

Идея антропного принципа¹⁹¹ восходит к замечанию, что законы природы удивительно хорошо приспособлены к существованию жизни. Знаменитым примером этого является синтез элементов. Согласно современным представлениям, этот синтез начался тогда, когда нашей Вселенной было примерно три минуты отроду (до этого момента было слишком жарко для того, чтобы протоны и нейтроны могли объединиться в атомные ядра), и затем продолжался внутри звезд. Сначала считалось, что элементы образовывались путем последовательного добавления по одной ядерной частице к атомному ядру, начиная с простейшего элемента — водорода, ядро которого состоит из одного протона. При построении таким образом ядра гелия, состоящего из четырех ядерных частиц (двух протонов и двух

172

нейтронов) не возникало никаких проблем, но уже следующий шаг оказался невозможным, так как не существует стабильных ядер с пятью ядерными частицами. В конце концов, решение проблемы было найдено Эдвином Солпитером в 1952 г.¹⁹² Оно заключалось в том, что при столкновении двух ядер гелия внутри звезды может образоваться нестабильное ядро изотопа ⁸Be, и прежде чем это ядро распадется обратно на два ядра гелия, оно может поглотить еще одно ядро гелия, образовав ядро углерода. Однако, как подчеркнул в 1954 г. Фред Хойл, для того, чтобы такой процесс мог осуществиться и привести к наблюдаемой распространенности углерода в космосе, должно существовать состояние ядра углерода с такой энергией, чтобы вероятность его образования при столкновении ядер гелия и бериллия-8 была аномально велика. (Именно такое состояние было затем найдено экспериментаторами, работавшими вместе с Хойлом¹⁹³.) Если в звездах образуется углерод, то уже нет никаких препятствий для образования и всех более тяжелых элементов, включая кислород и азот, необходимых для известных форм жизни¹⁹⁴. Но чтобы все это работало нужно, чтобы энергия того самого состояния ядра

углерода была очень близка к сумме энергий ядра бериллия-8 и ядра гелия. Если бы энергия такого состояния была слишком большой или слишком маленькой, в звездах смогло бы образоваться слишком мало ядер углерода или более тяжелых элементов, а из одних ядер водорода и гелия не могла бы возникнуть жизнь. Энергии ядерных состояний сложным образом зависят от всех физических констант, таких как массы и заряды разных типов элементарных частиц. На первый взгляд, кажется очень примечательным, что все константы должны иметь такие значения, которые позволяют образоваться ядрам углерода в описанной реакции.

Все же мне не кажутся очень убедительными свидетельства того, что законы природы специально настроены так, чтобы сделать возможной жизнь. С одной стороны, группа физиков¹⁹⁵ показала недавно, что можно существенно увеличить энергию обсуждаемого состояния ядра углерода без заметного уменьшения количества углерода, производимого в звездах¹⁹⁶. Кроме того, если мы начнем менять константы природы, найдется много других состояний ядра углерода и других ядер, которые позволят осуществить альтернативный синтез элементов тяжелее гелия. У нас нет разумных способов оценить, сколь мала вероятность того, что константы природы должны принимать значения, приемлемые для существования разумной жизни.

Мы не знаем, нужен или нет антропный принцип для объяснения значений энергий ядерных состояний, но в одном случае этот принцип кажется просто основанным на здравом смысле¹⁹⁷. Возможно, существуют различные логически допустимые вселенные, причем каждая со своим набором фундаментальных законов. Если это так, то несомненно существует множество вселенных, законы и история эволюции которых делают их неприемлемыми для разумной жизни.

173

Но всякий ученый, который спрашивает, почему мир такой, какой он есть, должен жить в одной из тех вселенных, где разумная жизнь *могла* возникнуть²⁾.

Слабым местом такой интерпретации антропного принципа является неясность понятия множественности вселенных. Одна из очень простых возможностей, предложенная Хойлом¹⁹⁸!, заключается в том, что константы природы меняются от места к месту, так что Вселенная разделена на некие субвселенные с разными законами в них. Похожая интерпретация множественности вселенных возникает и в том случае, если мы допустим, что те числа, которые мы называем константами природы, были разными в разные эпохи эволюции Вселенной. Кроме того, много обсуждалась более революционная возможность, что наша и другие логически возможные вселенные с другими окончательными законами каким-то образом отщепляются от большей Мегавселенной. Например, при недавних попытках применить квантовую механику к гравитации было замечено, что хотя обычное пустое пространство выглядит спокойным и не имеющим никаких свойств, как поверхность океана, если смотреть на нее с большой высоты, то при более внимательном рассмотрении пространство кишит квантовыми флуктуациями, так что могут открыться «кротовые норы»¹⁹⁹, соединяющие одни части Вселенной с другими частями, весьма удаленными в пространстве и во времени. В 1987 г., следуя идеям более ранней работы Стивена Хокинга, Джеймса Хартля и других, Сидни Коулмен из Гарварда показал, что открывающиеся и закрывающиеся кротовые норы эквивалентны изменению различных констант, входящих в уравнения для разных полей. Как и в случае интерпретации квантовой механики с помощью идеи о множественности вселенных, волновая функция Вселенной разделяется на огромное количество слагаемых, каждое из которых соответствует разным значениям «констант» природы²⁰⁰, принимаемых с разной вероятностью. Какую бы теорию этого типа не рассматривать, совершенно ясно, что мы обнаружим себя в той области пространства, или в той эпохе космической истории, или в том слагаемом общей волновой функции, в которых константы природы случайно приняли благоприятные для существования разумной жизни значения.

Конечно, физики продолжают попытки объяснить значения природных констант без обращения к антропному принципу. Мое собственное мнение заключается в том, что рано или поздно мы обнаружим, что все константы природы (возможно, за исключением одной)

²⁾ Физик, эмигрант из бывшего СССР, рассказывал мне, что несколько лет тому назад в Москве ходила шутка по поводу того, что антропный принцип объясняет, почему жизнь так плоха. Существует значительно больше возможностей того, чтобы жизнь была плохой, а не счастливой. Антропный принцип требует только, чтобы законы природы допускали существование разумных существ, но не утверждает, что эти существа будут радоваться жизни.

174

фиксируются теми или иными принципами симметрии, а существование каких-то форм жизни совершенно не требует особой тонкой настройки законов природы. Единственная константа природы, которую, может быть, придется объяснять с помощью какого-то подобия антропного принципа, это *космологическая постоянная*.

Первоначально космологическая постоянная возникла в физической теории при первой попытке Эйнштейна применить только что созданную общую теорию относительности ко Вселенной в целом. В этой работе Эйнштейн предположил, как это было в те годы принято, что Вселенная статична, но вскоре обнаружил, что уравнения тяготения в первоначальной форме, примененные для описания Вселенной в целом, не имеют статических решений. (Этот вывод, на самом деле, не является спецификой для общей теории относительности. В ньютоновской теории тяготения мы также можем получить решения, описывающие галактики, налетающие друг на друга под влиянием взаимного притяжения. Мы можем найти и решения, описывающие разлет галактик в результате какого-то начального взрыва. Однако вряд ли мы будем ожидать, что некая усредненная галактика будет просто неподвижно висеть в пространстве.) Чтобы получить решения, описывающие статическую Вселенную, Эйнштейн решил изменить теорию. Он ввел в свои уравнения слагаемое, которое было подобно силам отталкивания на больших расстояниях и могло компенсировать гравитационную силу притяжения. Введенное слагаемое содержало одну свободную постоянную, определявшую в статической космологии Эйнштейна размер Вселенной и получившую название *космологической постоянной*.

Все это происходило в 1917 г. Из-за войны Эйнштейн не знал, что американский астроном Весто Слайфер уже обнаружил свидетельства того, что галактики (как мы их сейчас называем) разлетаются в разные стороны, так что Вселенная на самом деле не статична, а расширяется. После войны Эдвин Хаббл, пользуясь новым 100-дюймовым телескопом на горе Маунт-Вильсон, подтвердил это расширение и измерил его скорость. Эйнштейн глубоко сожалел²⁰¹, что испортил свои уравнения

введением космологической постоянной. Однако возможность существования такой постоянной так просто не исчезла.

С одной стороны, нет оснований *не* включать космологическую постоянную в уравнения Эйнштейна. Теория Эйнштейна была основана на принципе симметрии, утверждавшем, что законы природы не должны зависеть от той системы отсчета в пространстве и во времени, которую мы используем для изучения этих законов. Но первоначальная теория Эйнштейна не была самой общей теорией, удовлетворяющей такому принципу симметрии. Существует громадное количество возможных разрешенных слагаемых, которые можно добавить в уравнения поля тяготения, причем влияние этих слагаемых на астрономических расстояниях будет пренебрежимо мало.

175

Но кроме этих слагаемых есть одно-единственное слагаемое, которое можно добавить в уравнения поля общей теории относительности без нарушения фундаментальных принципов симметрии этой теории и которое будет важно в космологических масштабах, — это слагаемое, включающее космологическую постоянную. В 1915 г. Эйнштейн опирался на предположение, что уравнения поля тяготения должны быть простейшими из возможных. Опыт последних трех четвертей XX в. научил нас не доверять такому предположению. Мы обнаружили, что всякое усложнение наших теорий, не запрещенное какой-то симметрией или другим фундаментальным принципом, происходит на самом деле. Поэтому недостаточно сказать, что космологическая постоянная это ненужное усложнение. Простота, как и все остальное, требует объяснения.

В квантовой механике проблема еще сложнее. Разные поля, заполняющие нашу Вселенную, испытывают непрерывные квантовые флуктуации, в результате которых пустое пространство обретает энергию. Эта энергия наблюдаема только благодаря оказываемому гравитационному действию. Дело в том, что энергия любого сорта порождает гравитационное поле и, в свою очередь, испытывает воздействие других гравитационных полей, так что энергия, заполняющая пространство, может оказывать существенное влияние на расширение Вселенной. Мы не можем вычислить энергию в единице объема, порождаемую такими квантовыми флуктуациями, — если пользоваться при расчете простейшими приближениями, энергия оказывается бесконечной. Но если сделать несколько разумных предположений о том, как отбросить высокочастотные флуктуации, ответственные за эту бесконечность, то вакуумная энергия в единице объема оказывается все равно чудовищно большой, в 10^{120} раз большей, чем это допускается наблюдаемой скоростью расширения Вселенной. Пожалуй, это самый худший провал оценки по порядку величины во всей истории науки.

Если энергия пустого пространства положительна, то она порождает гравитационное отталкивание между частицами материи на очень больших расстояниях, в точности как то слагаемое с космологической постоянной, которое Эйнштейн добавил к своим уравнениям в 1917 г. Поэтому мы можем рассматривать энергию, возникающую вследствие квантовых флуктуаций, как дающую вклад в «полную» космологическую константу. Расширение Вселенной определяется только этой полной космологической константой, а не отдельно той космологической константой, которая входит в полевые уравнения общей теории относительности, или константой, связанной с квантовой энергией вакуума. Возникает возможность, что проблема космологической постоянной может как бы скомпенсировать проблему энергии пустого пространства. Иными словами, возможно, что *отрицательная* космологическая постоянная в эйнштейновских

176

полевых уравнениях в точности сокращает действие чудовищной вакуумной энергии, возникающей за счет вакуумных флуктуаций. Но чтобы не войти в противоречие с тем, что мы знаем о расширении Вселенной, полная космологическая постоянная должна быть столь мала, что два слагаемых, из которых она состоит, обязаны сократиться вплоть до 120 первых значащих цифр. Это не пустяк, который можно оставить без объяснений.

В течение многих лет физики-теоретики пытаются понять механизм сокращения полной космологической постоянной²⁰², пока что без особого успеха. Если принять теорию струн, то ситуация становится еще хуже. Разные теории струн приводят к разным значениям полной космологической постоянной (включающей эффекты вакуума гравитационного поля), но все они оказываются чудовищно большими²⁰³. При такой большой полной космологической постоянной пространство было бы так скручено, что ни в малейшей степени не было бы похоже на обычное трехмерное пространство с евклидовой геометрией, в котором мы живем.

Если все иные способы объяснения не годятся, нам ничего не остается, как вернуться назад, к антропному принципу. Может существовать много разных «вселенных», каждая со своим значением космологической постоянной. Если это так, то единственная Вселенная, в которой, как можно думать, мы находимся, это та, где полная космологическая постоянная достаточно мала, чтобы жизнь могла возникнуть и развиваться. Более точно, если бы полная космологическая постоянная была большой и отрицательной, то Вселенная прошла бы свой цикл расширения и последующего сжатия слишком быстро, и жизнь не успела бы развиваться. Наоборот, если бы полная космологическая постоянная была большой и положительной, Вселенная продолжала бы вечное расширение, но силы отталкивания, порождаемые космологической постоянной, предотвратили бы гравитационное сжатие с образованием тех комков, из которых потом в ранней Вселенной возникли галактики и звезды, а следовательно, жизни опять не нашлось бы места. Возможно, что правильная теория струн — это теория (не знаем, единственная или нет), которая приводит к значению полной космологической постоянной, лежащему только в том сравнительно узком интервале небольших значений, которые допускают существование жизни.

Одним из интересных следствий такой линии рассуждений является вывод, что нет никаких причин, почему полная космологическая постоянная (включающая эффекты квантовых флуктуаций вакуума) должна строго равняться нулю. Антропный принцип требует всего лишь, чтобы она была достаточно мала и позволяла галактикам образоваться и выжить в течение миллиардов лет. На самом деле, астрономические наблюдения уже давно указывают на то, что пол-

177

ная космологическая постоянная не равна нулю, а имеет небольшое положительное значение.

Одно из таких свидетельств связано со знаменитой проблемой космологической «скрытой массы». Наиболее естественным значением плотности массы Вселенной (которое кстати, требуется и в популярных сейчас космологических теориях) является такое значение, которое только-только позволяет Вселенной расширяться вечно²⁰⁴. Но эта плотность в пять—десять раз больше той, которая определяется массой скоплений галактик (это вытекает из изучения движения

галактик в таких скоплениях). Скрытая масса могла бы соответствовать какому-то типу темной материи, но есть и другая возможность. Как уже отмечалось, наличие положительной космологической постоянной эквивалентно постоянной положительной однородной плотности энергии, которая, согласно знаменитому соотношению Эйнштейна между энергией и массой, эквивалентна постоянной однородной плотности массы. Таким образом, не исключено, что недостающие 80—90 % космической плотности «массы» обеспечиваются совсем не реальным веществом того или иного сорта, а положительной космологической постоянной.

Мы не хотим этим сказать, что нет вообще никакой разницы между плотностью реальной материи и положительной полной космологической постоянной. Вселенная расширяется, так что какой бы ни была сегодня плотность реальной материи, в прошлом она была значительно больше. Напротив, полная космологическая постоянная и соответствующая ей плотность массы неизменны во времени. Чем больше плотность материи, тем больше скорость расширения Вселенной, так что в прошлом скорость расширения должна была бы быть намного больше, если бы скрытая масса была связана не с космологической постоянной, а с обычной материей.

Другое указание на положительность полной космологической постоянной связано с давно дебатированной проблемой возраста Вселенной. В принятых космологических теориях мы используем наблюдаемую скорость расширения Вселенной, чтобы затем установить, что ее возраст составляет от 7 до 12 миллиардов лет. Но возраст сферических звездных скоплений внутри нашей собственной Галактики оценивается обычно как 12—15 миллиардов лет. Мы сталкиваемся с перспективой, что Вселенная моложе, чем звездные скопления внутри нее. Чтобы избежать этого парадокса, следует принять наименьшую оценку для возраста скоплений и наибольшую оценку для возраста Вселенной. С другой стороны, как мы видели, введение положительной космологической постоянной вместо темной материи приводит к уменьшению наших оценок скорости расширения Вселенной в прошлом, а следовательно, к увеличению возраста Вселенной, получаемого из любого сегодняшнего значения скорости расширения. Например, если космологическая постоянная вносит вклад в 90 % кос-

178

мической плотности массы, то даже при самых больших сегодняшних оценках скорости расширения, возраст Вселенной получается равным не семь миллиардов, а не менее одиннадцати миллиардов лет. Таким образом, исчезает всякое серьезное расхождение с возрастом сферических скоплений.

Положительная космологическая постоянная, обеспечивающая 80—90 % современной космической плотности массы, хорошо укладывается в те пределы, которые допускают существование жизни. Мы знаем, что квазары и, возможно, также галактики, уже образовались после Большого взрыва в эпоху, когда размер Вселенной был в шесть раз меньше, чем сейчас. Это следует из того факта, что мы наблюдаем свет от квазаров с длиной волны, увеличившейся в шесть раз (т. е. испытавшей красное смещение). В ту эпоху реальная плотность массы Вселенной была в шесть в кубе, т. е. в двести с лишним раз больше, чем сейчас, так что космологическая постоянная, соответствующая плотности массы, всего лишь в пять-десять раз большей *сегодняшней* плотности, не могла оказывать существенного влияния на образование галактик *тогда*, хотя и могла предотвратить образование галактик в более позднее время. Итак, исходя из антропного принципа, можно дать грубую оценку величины космологической постоянной — она должна обеспечивать плотность массы, в пять-десять раз большую чем сегодняшняя космическая плотность.

К счастью, этот вопрос (не в пример другим, обсуждавшимся в этой главе) можно довольно скоро решить с помощью астрономических наблюдений. Как мы видели, скорость расширения Вселенной в прошлом должна была быть гораздо больше, если скрытая масса состоит из обычной материи, а не связана с космологической постоянной. Эта разница в скоростях расширения влияет на геометрию Вселенной и на траектории световых лучей, что может быть замечено астрономами. (Например, должны меняться как число галактик, разбегающихся от нас с разными скоростями, так и число галактических гравитационных линз, т. е. галактик, гравитационные поля которых отклоняют лучи света от более далеких объектов, приводя к появлению нескольких изображений.) Пока что наблюдения не позволяют сделать окончательные выводы, но исследования активно проводятся в нескольких обсерваториях, так что вскоре будет либо подтверждена, либо опровергнута гипотеза, что космологическая постоянная обеспечивает 80—90 % сегодняшней плотности массы Вселенной. Такая космологическая постоянная все равно очень сильно меньше той, которая ожидается из оценок величины квантовых флуктуаций. Понять этот факт можно будет только с помощью антропного принципа. Итак, если наблюдения подтвердят такое значение космологической постоянной, появятся основания утверждать, что наше собственное существование входит важной составной частью в объяснение, почему Вселенная такая, какая она есть.

179

Все же, как бы ни было сейчас плохо, я надеюсь, что такого объяснения не потребуются. Как физик-теоретик я предпочел бы, чтобы мы могли делать точные предсказания, а не смутные утверждения, что значения каких-то констант должны лежать в интервале, более или менее благоприятном для существования жизни. Надеюсь, что теория струн станет реальной основой окончательной теории, и что эта теория будет обладать достаточной предсказательной силой, чтобы определить значения всех констант природы, включая и космологическую постоянную. Поживем — увидим.

ГЛАВА X. На пути к цели

Наконец-то полюс! Награда трех столетий... Я не мог заставить себя осознать это. Все казалось таким простым и обычным.

Роберт Пири. Дневник

Трудно представить, что мы когда-нибудь будем знать окончательные физические принципы, которые не объясняются с помощью еще более глубоких принципов. Многим кажется само собой разумеющимся, что вместо этого будет открываться бесконечная цепочка все более глубоких и глубоких принципов. Например, Карл Поппер, патриарх современных философов науки, отвергает *«идею окончательного объяснения»*²⁰⁵. Он настаивает, что «всякое объяснение можно объяснять дальше с помощью теории или предположения, имеющих большую степень универсальности. Не может существовать объяснения, не нуждающегося в дальнейшем объяснении...».

Может случиться, что Поппер и другие ученые, верящие в бесконечную цепь все более фундаментальных принципов, окажутся правы. Но мне кажется, что такую точку зрения нельзя обосновывать тем, что до сих пор никто не открыл окончательной теории. Это напоминает утверждения некоторых ученых XIX в., доказывавших, что поскольку все предыдущие арктические экспедиции в течение сотен лет обнаруживали, что как далеко на север не забирайся, там все равно остается еще больше неисследованных районов моря и льда, следовательно, либо нет никакого Северного полюса, либо во всяком случае никто его никогда не достигнет. Все же некоторым это удалось.

Создается широко распространенное впечатление, что в прошлом ученые часто убаюкивали себя мыслями, будто они нашли окончательную теорию. Они вели себя подобно исследователю Фредерику Куку, считавшему в 1908 г., что именно он достиг Северного полюса. Ученые строили сложные теоретические схемы, объявляли их окончательной теорией, а затем с тупым упорством защищали их,

181

пока неопровержимые экспериментальные доказательства не убеждали новые поколения ученых, что все эти схемы были неверны. Но, насколько я знаю, ни один уважаемый физик в XX в. не заявлял о создании окончательной теории. Правда, физики иногда недооценивают то расстояние, которое нужно еще пройти, прежде чем достичь окончательной теории. Вспомним предсказание Майкельсона, сделанное в 1902 г., что «вскоре наступит день, когда сходящиеся линии от многих, кажущихся далекими друг от друга областей знания соединятся... в общей точке». Совсем недавно Стивен Хокинг, принимая Лукасовскую кафедру математики в Кембридже (эту кафедру занимали перед ним Ньютон и Дирак), предположил в своей вступительной лекции, что модные в то время теории «расширенной супергравитации» станут основой теории, похожей на окончательную. Сомневаюсь, чтобы Хокинг повторил это сегодня. Но ни Майкельсон, ни Хокинг не заявляли, что окончательная теория уже построена.

Если история чему-нибудь учит, так это тому, что окончательная теория *существует*. В XX в. мы наблюдали схождение стрел объяснений, похожую на схождение меридианов к Северному полюсу. Основополагающие принципы нашей науки хотя и не приняли окончательной формы, но постоянно становились все проще и экономнее. Мы видели это схождение на примере свойств кусочка мела. Я сам наблюдал все это на протяжении моей карьеры ученого. Когда я учился на старших курсах, мне приходилось поглощать огромное количество разнообразной информации о слабых и сильных взаимодействиях элементарных частиц. Сегодняшние студенты, занимающиеся физикой элементарных частиц, изучают стандартную модель, много новой математики и этим ограничиваются. (Профессора физики часто в отчаянии воздевают руки к небу, ругая студентов, которые так мало знают о реальных явлениях в физике частиц, но думаю, что те, кто учил меня в Корнелле и Принстоне, точно так же воздевали руки по поводу того, как мало я знаю фактов, касающихся атомной спектроскопии.) Очень трудно воспринимать последовательность все более и более фундаментальных теорий, становящихся все проще и всеохватнее, и не верить, что цепочка объяснений где-то сойдется.

Маловероятно, но возможно, что последовательности все более фундаментальных теорий не будут ни сходящимися, ни бесконечно продолжающимися. Кембриджский философ Майкл Редхед полагает, что они могут замкнуться сами на себя²⁰⁶. Он отмечает, что ортодоксальная копенгагенская интерпретация квантовой механики требует существования макроскопического мира наблюдателей и измерительных приборов, что в свою очередь, объясняется с помощью квантовой механики. Эта точка зрения, по-моему, дает еще один пример неудовлетворительности копенгагенской интерпретации и разнице в подходах к объяснению квантовых явлений и наблюдателей, которые их изучают. В реалистическом же подходе к квантовой механике Хью

182

Эверетта и других существует только одна волновая функция, описывающая все явления, включая опыты и наблюдателей, причем фундаментальные законы описывают эволюцию этой волновой функции.

Еще более радикальной является гипотеза, что на дне мы обнаружим вообще полное отсутствие законов²⁰⁷. Мой друг и учитель Джон Уилер когда-то предположил, что нет никакого фундаментального закона, а все законы, которые мы сейчас изучаем, приписываются природе благодаря тем способам, которыми мы совершаем наблюдения²⁰⁸. Рассуждая несколько иначе, теоретик из Копенгагена Хольгер Нильсен предложил «случайную динамику»²⁰⁹, согласно которой, что бы мы ни предположили об устройстве природы на очень малых расстояниях или при очень больших энергиях, все явления, доступные наблюдению в наших лабораториях, будут выглядеть примерно одинаково.

Мне кажется, что и Уилер, и Нильсен просто отпихивают от себя проблему окончательных законов. Мир Уилера, в котором нет законов, все равно нуждается в метазаконах, которые должны указывать нам, как наблюдения создают регулярности в природных явлениях. Среди метазаконных должна быть и сама квантовая механика. Аналогично, Нильсен нуждается в некотором метазаконе, объясняющем как выглядит природа, если изменить шкалу расстояний и энергий, в которой мы проводим наши измерения. Для этой цели он предполагает, что справедливы так называемые уравнения

ренормализационной группы, но существование таких уравнений в мире без всяких законов кажется весьма проблематичным. Я подозреваю, что все попытки обойти без фундаментальных законов природы если и будут успешными, то сведутся к введению метазакон, описывающих как возникает то, что *сейчас* мы называем законами.

Есть еще одна возможность, которая представляется мне более вероятной и более тревожной. Возможно, что окончательная теория, т. е. простой набор принципов, из которых вытекают все объяснения, действительно существует, но мы никогда не сможем узнать, что это такое. Например, вполне может быть так, что люди просто недостаточно разумны, чтобы открыть или понять окончательную теорию. Вполне можно натренировать собаку выполнять разные умные вещи, но думаю, никому не удастся научить собаку использовать квантовую механику для расчета уровней энергии атома. Лучшим аргументом в пользу того, что наш род способен к дальнейшему интеллектуальному прогрессу является наша волшебная способность объединять наши мозги с помощью языка. Но этого может оказаться мало. Юджин Вигнер предупреждал, что «у нас нет оснований утверждать, что наш разум может сформулировать идеальные законы, полностью объясняющие явления неодушевленной природы»²¹⁰. К счастью, до сих пор, похоже, наши интеллектуальные ресурсы не исчерпаны. По крайней

183

мере, в физике каждое новое поколение студентов-старшекурсников кажется талантливее предыдущего.

Значительно большую тревогу вызывает то, что попытка открыть окончательные законы может упереться в проблему денег. Мы уже ощутили вкус этой проблемы во время недавних дебатов в США о завершении строительства ССК. Цена в 8 миллиардов долларов на десять лет вполне укладывается в возможности страны, но даже сами физики не торопятся предлагать более дорогие проекты ускорителей следующего поколения.

Помимо оставшихся невыясненными вопросов о стандартной модели, на которые мы надеемся получить ответ с помощью ССК, существуют и более глубокие вопросы, касающиеся объединения сильных, электрослабых и гравитационных взаимодействий, которые невозможно адресовать ни к одному из планируемых сейчас ускорителей. Истинно фундаментальная планковская энергия, при которой все эти вопросы можно экспериментально изучать, примерно в сто триллионов раз больше, чем энергия ССК. Ожидается, что все силы природы объединятся именно при этой энергии. Кроме того, согласно современным теориям струн, примерно такая же энергия нужна на то, чтобы возбудить первые моды колебаний струн, кроме тех низших мод, которые наблюдаются как обычные кварки, фотоны и другие частицы, описываемые стандартной моделью. К сожалению, такие энергии безнадежно недостижимы. Даже если объединить все экономические ресурсы человечества и направить их на решение этой задачи, мы все равно не представляем сегодня, как построить машину, способную ускорять частицы до таких энергий. Дело не в том, что сами по себе такие энергии недостижимы — планковская энергия, грубо говоря, равна химической энергии сгорания полного бака бензина в автомобиле. Трудность в том, как сконцентрировать всю эту энергию в одном протоне или электроне. Нам нужны совершенно новые идеи относительно конструкции ускорителей, кардинально отличающиеся от используемых сегодня. Возможно, удастся использовать ионизированный газ, чтобы облегчить передачу энергии от мощных лазерных пучков к отдельным заряженным частицам, но даже если это удастся осуществить, скорость реакций частиц при таких энергиях будет настолько мала, что эксперименты станут невозможными. Более вероятно, что новые достижения в теории или в экспериментах другого типа когда-нибудь сделают ненужным строительство ускорителей, позволяющих получить все большие и большие энергии.

Моя точка зрения заключается в том, что окончательная теория существует, и мы способны ее открыть. Может быть, эксперименты на ССК дадут настолько важную новую информацию, что теоретики смогут завершить работу над окончательной теорией, не обращаясь к изучению процессов между частицами при планковских энергиях.

184

Возможно, что уже сегодня мы можем подобрать кандидата на подобную окончательную теорию среди теорий струн.

Как было бы странно, если бы окончательная теория была создана при нашей жизни! Открытие окончательных законов природы означало бы самый резкий скачок в интеллектуальной истории человечества со времен начала развития современной науки в XVII в. Можем ли мы сейчас вообразить, на что все это было бы похоже?

Хотя и нетрудно представить окончательную теорию, которая *не имеет* объяснений с помощью более глубоких принципов, очень трудно вообразить окончательную теорию, которая *не нуждается* в таком объяснении. Какой бы ни была окончательная теория, она определенно не будет логически *неизбежной*. Даже если окажется, что окончательная теория — это теория струн, которую можно выразить в нескольких простых уравнениях, и даже если нам удастся показать, что это единственно возможная квантово-механическая теория, способная математически непротиворечиво описать гравитацию наравне с другими силами, мы все равно не перестанем задавать себе вопросы, почему вообще существует тяготение, и почему природа должна подчиняться правилам квантовой механики. Почему Вселенная не состоит просто из точечных частиц, вечно вращающихся по своим орбитам согласно законам ньютоновской механики? Почему вообще все существует? Редхед, возможно, отражает точку зрения большинства²¹¹, когда отрицает всякий смысл «в поиске каких-то самодостаточных априорных оснований науки».

С другой стороны, Уилер как-то заметил, что когда мы доберемся до окончательных законов природы, мы будем страшно удивлены, как это мы до них сразу не догадались. Возможно, Уилер и прав, но только потому, что очевидность этих законов станет для нас результатом хорошей тренировки, которая длилась многие века научных разочарований и успехов. Думаю, что старый вопрос: «Почему?», может быть, в несколько смягченной форме, и в этом случае останется с нами. Гарвардский философ Роберт Нозик пытался разрешить эту проблему и пришел к выводу, что вместо попыток вывести окончательную теорию на основе чистой логики нам нужно искать аргументы в пользу привлекательности такой теории, выходящие за рамки голых фактов²¹².

С моей точки зрения, лучшее, на что можно надеяться, — это доказать, что окончательная теория, не будучи логически неизбежной, все же логически *изолирована*. Иными словами, может оказаться, что хотя мы всегда сможем представить другие теории, полностью отличные от истинной окончательной теории (вроде скучного мира частиц, управляемых законами ньютоновской механики), обнаруженная нами окончательная теория будет настолько жесткой, что любая попытка

хоть чуть-чуть ее изменить будет приводить к логическим противоречиям. В логически изолированной теории каждая константа

185

природы может быть вычислена из первых принципов, малое изменение значения любой константы разрушит согласованность теории. Окончательная теория будет напоминать кусок дорогого фарфора, который невозможно согнуть, не разрушив. В этом случае, хотя мы и не будем знать, почему окончательная теория верна, мы будем, основываясь на логике и чистой математике, знать, по крайней мере, почему истина выглядит так, а не иначе.

Это не просто возможность: мы уже довольно далеко прошли по дороге к такой логически изолированной теории. Самыми фундаментальными из известных физических принципов являются законы квантовой механики, лежащие в основе всего, что мы знаем о материи и ее взаимодействиях. Квантовая механика не является логически неизбежной; нет ничего логически невозможного и в ее предшественнице — механике Ньютона. Тем не менее, все попытки физиков *хоть чуточку* изменить законы квантовой механики, не приходя при этом к логическим несуразностям вроде отрицательных значений вероятностей, полностью провалились.

Но квантовая механика сама по себе еще не есть полная физическая теория. Она ничего не говорит нам о том, какие частицы и силы могут существовать в природе. Откройте любой учебник по квантовой механике. Вы найдете там множество примеров самых разнообразных гипотетических частиц и сил, причем большинство из них не имеют ничего общего с теми, которые реально наблюдаются в природе. Но при этом все эти частицы и силы прекрасно согласуются с принципами квантовой механики, так что их можно использовать для тренировки студентов в применении этих принципов. Разнообразие возможных теорий резко уменьшается, если рассматривать только те квантово-механические теории, которые совместимы с специальной теорией относительности. Большинство таких теорий можно логически исключить, так как они тянут за собой всякие глупости, вроде бесконечных энергий или бесконечных скоростей реакций. Но и после этого остается множество логически возможных теорий, например, теория сильных ядерных взаимодействий — квантовая хромодинамика, в рамках которой во Вселенной нет ничего, кроме кварков и глюонов. Большинство из оставшихся теорий исключаются, если потребовать, чтобы они включали в себя гравитацию. Не исключено, что нам удастся математически доказать, что такие требования оставляют только одну логически возможную квантово-механическую теорию, возможно, какую-то единственную теорию струн. Если такое случится, то хотя и останется еще огромное количество других логически возможных окончательных теорий, лишь одна из них будет описывать что-то отдаленно напоминающее наш собственный мир.

Но почему окончательная теория должна описывать что-то похожее на наш мир? Объяснение, возможно, связано с тем, что Нозик назвал *принципом плодovitости*. Он утверждает, что все логически

186

возможные вселенные в определенном смысле существуют, причем в каждой — свои наборы фундаментальных законов. Принцип плодovitости сам ничем не объясняется, но в нем есть, по крайней мере, какая-то приятная самосогласованность. Как пишет Нозик, принцип плодovitости утверждает, что «реализуются все возможности, в том числе, и возможность существования самого этого принципа».

Если такой принцип верен, то существует наш собственный квантово-механический мир, но существует и ньютоновский мир частиц, вечно вращающихся друг относительно друга, существуют бесчисленные миры, в которых нет ничего, и существуют столь же бесчисленные миры, свойства которых мы даже не можем себе представить. Разница между этими мирами не просто в разнице так называемых констант природы, меняющихся от одной части Вселенной к другой, от одной эпохе к другой или от одного слагаемого в волновой функции к другому. Как мы видели, все подобные возможности могут быть реализованы как следствия некоторой действительно фундаментальной теории, вроде квантовой космологии. Но при этом мы все равно должны будем понять, почему фундаментальная теория такая, а не другая. Вместо этого принцип плодovitости предполагает, что существуют совершенно разные вселенные, подчиняющиеся совершенно разным законам. Но если все эти вселенные недостижимы и непознаваемы, утверждение об их существовании, похоже, не имеет никакого смысла, кроме возможности избежать вопроса, почему они не существуют. Похоже, проблема в том, что мы пытаемся рассуждать логически по поводу вопроса, не поддающегося логическому анализу: что должно или не должно вызывать в нас ощущение чуда.

Принцип плодovitости дает еще один способ подтвердить полезность антропного принципа для объяснения, почему окончательные законы *нашей* Вселенной таковы, каковы они есть. Может существовать множество допустимых вселенных, законы природы в которых или история эволюции неблагоприятны для возникновения разумной жизни, однако любой ученый, спрашивающий о том, почему мир устроен так, а не иначе, обязательно должен жить в одной из других вселенных, где разумная жизнь *могла* возникнуть. С этой точки зрения, можно сразу отвергнуть вселенную, управляемую ньютоновской физикой (помимо всего прочего, в ней не было бы стабильных атомов), или вселенную, в которой нет ничего.

Есть и экстремальная возможность, что существует только одна логически изолированная теория, *не содержащая* неопределенных констант и совместимая с существованием разумных существ, способных размышлять над окончательной теорией. Если это удастся показать, то мы окажемся так близко, насколько это возможно, к удовлетворительному объяснению того, почему мир таков, каков он есть.

Каковы будут последствия открытия подобной окончательной теории? Конечно, полный ответ можно будет дать только после того,

187

когда мы эту теорию узнаем. Может быть, то, что мы узнаем об устройстве мира, будет для нас столь же удивительным, как законы ньютоновской механики были бы удивительны для Фалеса. Но можно быть твердо уверенным в одном: открытие окончательной теории не станет концом научных исследований. Даже если не касаться проблем, которые необходимо будет исследовать в связи с техникой или медициной, останется множество проблем чистой науки, над которыми ученые будут биться, так как у этих задач должны быть красивые решения. Уже сейчас в физике есть явления вроде турбулентности или высокотемпературной сверхпроводимости, ожидающие глубокого и красивого объяснения. Никто не знает толком, как образовались галактики, как был запущен генетический механизм, или как знания хранятся в мозгу человека. Ни на одну из

этих проблем открытие окончательной теории не окажет никакого влияния.

С другой стороны, открытие окончательной теории может иметь последствия, выходящие далеко за рамки науки. Умы многих людей заражены сегодня различными иррациональными предубеждениями, от сравнительно безобидной астрологии до сатанинских идеологий крайне опасного толка. То, что до сих пор мы не знаем окончательных законов природы, позволяет всем этим людям надеяться, что когда-нибудь их любимые предрассудки найдут подобающее место в структуре науки. Было бы глупо надеяться, что любое открытие в науке может само по себе излечить человечество от всех его предрассудков, но все же открытие окончательной теории, по крайней мере, оставило бы меньше места для иррациональных верований.

Открытие окончательной теории может принести разочарование, так как природа станет более обычной, в ней останется меньше чудес и тайн. Нечто подобное уже случалось и ранее. На протяжении почти всей человеческой истории карты Земли указывали неизведанные пространства, так что воображение людей могло заполнять их драконами, золотыми городами и антропофагами. Поиск знаний во многом был уделом географических открытий. Когда тенниссоновский Улисс решил «последовать за знанием как звезда на небе, и погрузиться в самые глубины человеческих мыслей», он отправился через неизведанную Атлантику «в сторону заката, к месту купания всех западных звезд». Но в наши дни каждый гектар поверхности Земли нанесен на карты, и все драконы куда-то улетели. С открытием окончательных законов испарятся наши мечты. Останется бесконечное количество научных задач, перед учеными раскроется для исследования вся Вселенная, но подозреваю, что ученые будущего будут немного завидовать физикам наших дней, так как мы все еще идем по дороге, ведущей к открытию окончательных законов.

ГЛАВА XI. А как насчет Бога?

— Ты знаешь, — сказал Порт, и голос его звучал как-то странно, как это бывает после долгого молчания в мертвой тишине, — здесь небо очень странное. Когда я гляжу на него, мне часто кажется, что там, наверху, — стена, защищающая нас от того, что за ней.

Кейт слегка вздрогнула и переспросила:

— От того, что за ней?

— Да.

— Но что там, за ней? — Ее голос был еле слышен.

— Я думаю, ничего. Просто тьма. Полная ночь.

Поль Боулс. Охраняющие небеса

«Небеса проповедуют славу Божию, и о делах рук Его вещает твердь»²¹³. Царю Давиду или тому, кто писал этот псалом, звезды должны были казаться зримым свидетельством более высокого существования, совершенно непохожего на наш скучный подлунный мир из скал, камней и деревьев. Со времен Давида утекло много воды. Солнце и другие звезды давно уже потеряли особый статус. Мы понимаем теперь, что это шарообразные тела из раскаленного газа, сжимаемые силами тяготения, которым противодействуют силы теплового давления, возникающие за счет термоядерных реакций в сердцевине звезд. О славе Божией эти звезды говорят нам не больше и не меньше, чем камни, валяющиеся вокруг нас.

Если и есть что-то в природе, что мы могли бы открыть, и что пролило бы свет на дело рук Божьих, так это окончательные законы природы. Зная эти законы, мы имели бы в своем распоряжении книгу правил, управляющих звездами, камнями и всем чем угодно. Физик Стивен Хокинг называет законы природы Божественным разумом²¹⁴, и это вполне оправданно. Другой физик, Чарльз Мизнер, использует такой же образ²¹⁵, сравнивая перспективы развития фи-

189

зики и химии: «Химик-органик на вопрос: „Почему существуют девяносто два элемента и когда они были созданы?“ может ответить: „Это знают в соседнем кабинете“. Но физик, если его спросят: „Почему Вселенная устроена так, что в ней действуют именно эти, а не другие физические законы?“, вполне может ответить: „А бог его знает“».

Эйнштейн как-то сказал своему ассистенту Эрнсту Шварцу: «Что меня действительно интересует, так это вопрос, имел ли Бог выбор, создавая наш мир?»²¹⁶ По другому поводу он сформулировал цель занятий физикой в том, чтобы «не только знать, какова природа и как ведутся ее дела, но приблизиться, насколько это возможно, к утопической и кажущейся самонадеянной цели — узнать, почему природа такая, а не другая... Узнать, что, так сказать, сам Господь не мог бы устроить все иным, отличным от уже существующего теперь, образом... В научном исследовании имеется прометеевский элемент... В этом для меня всегда была особая магия научного исследования»²¹⁷. Религия Эйнштейна была столь неопределенной, что, мне кажется, он выражался метафорически, это чувствуется по словам «так сказать». Несомненно, что подобная метафора вполне естественна для физиков, поскольку физика — наука фундаментальная. Теолог Поль Тиллих заметил как-то²¹⁸, что среди всех ученых только физики способны употреблять слово «бог» без смущения. Верит физик во что-нибудь или является атеистом, он неизбежно прибегает к этой метафоре, когда говорит об окончательных законах, как о проявлении Божественного разума...

Я однажды столкнулся с этим в неожиданном месте, в офисе палаты представителей в Вашингтоне. В 1987 г. я давал показания в защиту проекта Сверхпроводящего суперколлайдера (ССК) перед комитетом палаты по науке, космосу и технологиям. Я описал, как в процессе изучения элементарных частиц мы открываем законы, которые становятся все более согласованными и универсальными, и как мы начинаем подозревать, что это не случайность, что существует красота этих законов, отражающая что-то, что встроено в структуру Вселенной на самом глубоком уровне. После того, как я сделал эти замечания, последовали замечания других свидетелей и вопросы со стороны членов палаты. Они вылились в диалог между двумя членами комитета²¹⁹, конгрессменом Гаррисом Фавеллом, республиканцем из Иллинойса, который в целом положительно относился к проекту ССК, и конгрессменом Доном Риттером, республиканцем из Пенсильвании, бывшем инженер-металлурге, который был одним из самых яростных противников проекта в конгрессе.

М-р Фавелл: ...Благодарю вас. Я удовлетворен всеми вашими показаниями. Считаю, что они были замечательными. Если когда-нибудь мне понадобится кому-то объяснить, почему нужен ССК, я обращусь за помощью к вашим свидетельствам. Они будут очень полезны. Иногда мне хочется, чтобы все было выражено в одном слове, хотя это

190

почти невозможно. Мне кажется, др. Вайнберг, что вы близко подошли к этому, и хотя я не уверен, но записал вашу мысль. Вы сказали, что подозреваете, что не случайно существуют законы, управляющие материей, и я пометил у себя, что не поможет ли это найти Бога? Я уверен, что вы не говорили этого, но действительно ли это поможет нам узнать столь многое о Вселенной?

М-р Риттер: Настаивает ли уважаемый коллега на сказанном? Если мне позволят на минуту прервать джентльмена, я хотел бы сказать...

М-р Фавелл: Я не уверен, что хочу настаивать.

М-р Риттер: Если эта машина может сделать такое, я собираюсь изменить свою точку зрения и поддержать проект.

У меня хватило здравого смысла не влезать в спор, так как я не думаю, что конгрессмены хотели знать мое мнение о поиске Бога на ССК, а также потому, что я не был уверен, что изложение моих мыслей обо всем этом будет полезным для проекта.

Представления некоторых людей о Боге столь широки и податливы, что эти люди неизбежно находят Бога везде, куда ни обратиться их взор: «Бог — это предел всего», «Бог — наше лучшее естество» или: «Бог — это Вселенная». Конечно, слову «бог», как и всякому иному, можно придать любой смысл по нашему желанию. Если вы захотите заявить, что «Бог — это энергия», то обнаружите Бога и в куче угля. Но если все же слова имеют для нас хоть какую-то ценность, нам следует

уважать то, в каком смысле они исторически употреблялись, особенно сохраняя те различия, которые не дают смыслу одних слов смешиваться со смыслом других.

Мне кажется, что если слово «бог» и должно как-то использоваться, оно должно подразумевать заинтересованного Бога, Создателя и Законодателя, установившего не только законы природы и Вселенной, но и нормы добра и зла, личность, проявляющую участие в наших делах, короче, существо, которому стоит поклоняться¹⁾. Это тот Бог, который имел значение для мужчин и женщин на протяжении всей истории. Ученые и другие люди иногда используют слово «*бог*» для обозначения чего-то столь абстрактного и неопределенного, что Его нельзя отличить от законов природы. Эйнштейн сказал однажды, что он верит «в Бога Спинозы, проявляющего себя в гармонии всего сущего, а не в Бога, занимающегося судьбами и деяниями человеческих существ»²²⁰. Но есть ли для нас какая-то разница в том, используем ли мы слово «бог» вместо слов «порядок» или «гармония», за исключением, может быть, желания избежать обвинения в безбожии? Конечно, каждый волен использовать слово «бог» в таком

¹⁾ Всем должно быть ясно, что обсуждая эти вещи, я говорю только о самом себе, и что в этой главе я игнорирую любые требования компетентности.

191

смысле, но мне кажется, что тогда понятие Бога делается не столько неправильным, сколько не очень существенным.

Найдем ли мы заинтересованное божество в окончательных законах природы? В самой постановке вопроса есть что-то абсурдное, и не только потому, что мы до сих пор не знаем окончательных законов, но в еще большей степени потому, что мы не в силах даже представить себя в положении обладателей всех окончательных законов, не требующих объяснения с помощью еще более глубоких принципов. Но сколь бы необдуманным ни казался этот вопрос, вряд ли можно удержаться от искушения узнать, сможем ли мы найти какой-то ответ на наши самые глубокие вопросы, увидим ли мы какие-то признаки деятельности заинтересованного Творца в окончательной теории. Я думаю, что этого не произойдет.

Весь наш опыт на протяжении всей истории науки свидетельствует об обратном движении — к холодной безличности законов природы. Первый великий шаг в этом направлении заключался в демистификации небес. Каждому известны главные действующие лица: Коперник, Галилей, обосновавший правоту Коперника²²¹, Бруно, высказавший догадку, что Солнце — лишь одна из множества звезд, и Ньютон, показавший, что одни и те же законы движения и тяготения применимы как к Солнечной системе, так и к телам на Земле²²². Я полагаю, что ключевым было наблюдение Ньютона, что один и тот же закон тяготения управляет и движением Луны вокруг Земли, и движением тела, падающего на поверхность Земли. Уже в XX в. еще один шаг к развенчанию таинственной роли неба был сделан американским астрономом Эдвином Хабблом. Измерив расстояние до туманности Андромеды, Хаббл показал, что она (а следовательно, и тысячи похожих на нее туманностей) находится не на окраине нашей Галактики, а представляет самостоятельную галактику, не менее впечатляющую, чем наша. Современные космологи говорят даже о принципе Коперника: ни одна космологическая теория не должна восприниматься всерьез, если в ней нашей Галактике приписывается какое-то особое место во Вселенной.

И жизнь также потеряла покров таинственности. В начале XIX в. Юстус фон Либих и другие химики-органики показали, что не существует препятствий к лабораторному синтезу ряда химических соединений, например мочевины, связанных с феноменом жизни. Наиболее важными были работы Чарльза Дарвина и Альфреда Рассела Уоллеса, показавших, каким образом чудесные способности живых существ могут развиваться путем естественного отбора без всякого предварительного плана или руководства. В XX в. процесс демистификации ускорился, о чем свидетельствуют непрерывные успехи биохимии и молекулярной биологии в объяснении деятельности живых существ.

Исчезновение покрова таинственности над явлением жизни оказало значительно большее влияние на религиозные чувства, чем

192

любое открытие в физике. Неудивительно, что наиболее непримиримое противодействие продолжают встречать не открытия в физике и астрономии, а редукционизм в биологии и теория эволюции.

Даже от ученых можно услышать иногда намеки на витализм, т. е. веру в то, что существуют биологические процессы, которые нельзя объяснить с помощью химии и физики. В XX в. биологи (включая антиредукционистов вроде Эрнста Майра) в целом стараются отстраниться от витализма, но не далее как в 1944 г. Эрвин Шрёдингер доказывал в своей книге «Что такое жизнь?», что «мы уже достаточно много знаем о материальной основе жизни, чтобы с уверенностью утверждать, что сегодняшние законы физики не могут описать это явление». Доводы Шрёдингера сводились к тому, что генетическая информация, управляющая живыми организмами, слишком устойчива для того, чтобы вписаться в мир непрерывных флуктуаций, описываемых законами квантовой механики и статистической физики. Ошибка Шрёдингера была отмечена Максом Перутцем²²³, специалистом по молекулярной биологии, установившим среди прочего структуру гемоглобина: Шрёдингер не принял во внимание устойчивость, которую могут порождать химические процессы, известные как катализ энзимов.

Возможно, один из самых уважаемых ученых критиков теории эволюции, профессор Филип Джонсон²²⁴ из Калифорнийского юридического института, признает, что эволюция происходила, и что в некоторых случаях это было связано с естественным отбором, но он настаивает, что «не существует неопровержимых экспериментальных доказательств», что эволюция не управлялась каким-то Божественным планом. Конечно, нечего и надеяться когда-либо доказать, что никакая сверхъестественная сила не нажимала на рычажки, чтобы благоприятствовать одним мутациям и мешать другим. Но примерно то же можно сказать о любой научной теории. Успешное применение законов Ньютона или Эйнштейна к движению тел Солнечной системы никак не мешает предположению, что изредка какая-то комета получает небольшой толчок от Божественной канцелярии. Совершенно ясно, что Джонсон ставит этот вопрос не из-за желания проявить беспристрастную непредубежденность, а потому, что по религиозным соображениям его гораздо больше заботит проблема жизни, чем движение комет. Однако единственный путь, по которому может идти любая наука, это предположить, что не было никакого Божественного вторжения, и посмотреть, насколько далеко удастся при этом продвинуться.

Джонсон пытается доказать, что естественная эволюция, «та эволюция, которая совершается без участия или руководства Создателя, находящегося вне природы», на самом деле не позволяет удовлетворительно объяснить происхождение видов.

Думаю, что здесь он ошибается, так как недостаточно чувствует те проблемы, с которыми сталкивается любая научная теория при попытке описать то, что мы

193

наблюдаем. Даже если отвлечься от прямых ошибок, наши вычисления и наблюдения всегда основаны на предположениях, выходящих за пределы применимости той теории, которую мы проверяем. Никогда не было такого положения, чтобы вычисления, основанные на ньютоновской теории тяготения или на любой другой теории, находились бы в идеальном согласии со всеми экспериментами. В трудах современных палеонтологов и биологов-эволюционистов можно обнаружить проблемы, которые так знакомы физикам. Используя теорию естественной эволюции, биологи имеют дело с поразительно успешной теорией, которая, однако, далеко не завершена, чтобы объяснить все факты. Мне кажется чрезвычайно важным, что мы можем далеко продвинуться в объяснении мира не только в физике, но и в биологии, не привлекая при этом Божественное вмешательство.

Однако Джонсон прав в другом отношении. Он показывает, что между теорией естественной эволюции и религией в обычном понимании существует пропасть, и резко критикует тех ученых и педагогов, которые это отрицают. Он настаивает, что «естественный отбор совместим с существованием Бога только при условии, что под словом „бог" мы подразумеваем не более чем первопричину, устранившуюся от дальнейшей деятельности после того, как установлены законы природы, и запущен естественный механизм».

Проблема несовместимости современной теории эволюции и веры в заинтересованного Бога, по моему мнению, не относится к логике. Можно вообразить, что Бог установил законы природы и привел в действие механизм эволюции с намерением, чтобы когда-нибудь в результате естественного отбора возникли мы с вами, однако, существует реальная несовместимость темпераментов. В конце концов религиозные чувства возникают не в головах тех мужчин и женщин, которые занимаются спекуляциями о наделенных даром предвидения первопричинах, а в сердцах тех, кто тоскует по непрерывному вмешательству заинтересованного Бога.

Религиозные консерваторы, не в пример их либеральным оппонентам, понимают, как высоки ставки в спорах о преподавании теории эволюции в школах. В 1983 г., вскоре после переезда в Техас, я был приглашен выступить перед комиссией сената штата Техас по поводу закона, запрещающего изложение теории эволюции в издаваемых за счет штата учебниках для вузов, если равное количество страниц в них не посвящено креационизму. Один из членов комитета спросил меня, как может штат поддерживать преподавание научной теории, вроде теории эволюции, которая столь разрушительно действует на религиозные чувства. Я ответил, что было бы неправильно, если бы приверженец атеизма уделял теории эволюции больше внимания, чем это нужно для преподавания биологии, но согласно первой поправке к Конституции было бы столь же неправильно уделять эволюции меньше внимания, чтобы защищать религиозные верования.

194

Просто это не дело учебных заведений — так или иначе обсуждать религиозные приложения научных теорий. Мой ответ не удовлетворил сенатора, так как и он, и я знали, какой эффект будет от курса биологии, в котором теории эволюции уделено должное место. Когда я покидал зал заседаний, он пробормотал мне вслед, что «Бог все равно на небесах». Может быть и так, но битву мы выиграли: в издаваемых в Техасе учебниках для высшей школы не только разрешено, но требуется излагать современную теорию эволюции, причем без всякого креационистского вздора. Но на Земле есть много мест (в наши дни особенно в странах ислама), где эту битву еще предстоит выиграть, причем нет уверенности, что она будет выиграна надолго.

Часто можно услышать, что между религией и наукой нет противоречия. Например, в рецензии на книгу Джонсона Стивен Гулд замечает, что религия и наука не вступают в противоречие, так как «наука изучает фактическую действительность, а религия исследует человеческую мораль»²²⁵. В большинстве случаев я согласен с Гулдом, но здесь он зашел слишком далеко. Значение религии определяется тем, во что реально верят религиозные люди, и я полагаю, что большая часть верующих во всем мире была бы удивлена, если бы узнала, что религия не имеет отношения к фактической действительности.

Однако точка зрения Гулда широко распространена в наши дни среди ученых и религиозных либералов. Это кажется мне серьезным отступлением религии от ранее занимаемых позиций. Когда-то природа казалась необъяснимой без нимфы в каждом ручье и дриады на каждом дереве. Даже в конце XIX в. развитие растений и животных рассматривалось как явное доказательство существования Творца. В природе есть еще бесчисленное количество вещей, которые мы не можем объяснить, но мы полагаем, что знаем те принципы, на которых они построены. Тот, кто хочет настоящей тайны, должен обратиться к космологии и физике элементарных частиц. Для тех, кто не видит никакого конфликта между религией и наукой, религия практически полностью отступила с территории, занятой наукой.

Судя по этому историческому опыту, я предполагаю, что, хотя мы и будем восторгаться красотой окончательных законов природы, мы не обнаружим, что жизнь или разум имеют особый статус. Более того, мы не откроем никаких стандартов моральных ценностей. Таким образом, мы не найдем никаких указаний на существование какого-то Бога, заботящегося об этих вещах. Моральные принципы можно обнаружить где угодно, но только не в законах природы.

Должен признать, что иногда природа кажется более красивой, чем это строго необходимо. За окном моего домашнего кабинета растет каркасное дерево, на которое часто прилетают стайки птиц: голубые сойки, виреи с желтыми горлышками и самые редкие, но и самые красивые красные кардиналы. Хотя я достаточно хорошо понимаю, каким образом в результате соревнования самцов постепенно разви-

195

лась эта яркая окраска перьев, все же возникает почти непреодолимое желание вообразить, что вся эта красота была когда-то создана нам на радость. Однако бог птиц и деревьев должен быть также и богом врожденных уродств и рака.

Верующие люди в течение столетий пытаются разрешить проблему теодицеи, т. е. проблему существования страданий в мире, который, по предположению, управляется Богом, несущим только благо. Были найдены хитроумные решения этой проблемы, основанные на различных предполагаемых Божественных планах. Я не собираюсь даже пытаться возражать против этих решений, тем более предлагать свое собственное. Воспоминания о Холокосте отталкивают меня от попыток оправдать отношение Бога к Человеку. Если существует Бог, имеющий по отношению к человеку особые планы, то Он очень

сильно постарался запрятать свою заботу о нас как можно дальше. Мне кажется невежливым, если не сказать неучтивым, возносить такому Богу свои молитвы.

Далеко не все ученые согласятся с моим мрачным взглядом на окончательные законы. Я не знаю никого, кто бы прямо заявлял, что есть научные свидетельства существования Бога, но ряд ученых настаивает на особом статусе разумной жизни в природе. Конечно, всем понятно, что на практике биология и психология должны изучаться по-особому, используя свой язык, отличный от языка физики элементарных частиц, но это не признак какого-то особого статуса жизни или разума; это же верно для химии или гидродинамики. Если, с другой стороны, мы обнаружим в окончательных законах, в точке соединения всех стрелок объяснений особую роль разумной жизни, мы с полным основанием сможем заключить, что Создатель, установивший эти законы, был как-то особенно заинтересован в нашем существовании.

Джон Уилер поражен тем фактом, что, согласно стандартной копенгагенской интерпретации квантовой механики, невозможно точно сказать, что физическая система обладает определенными значениями таких величин, как координата, энергия или импульс, пока эти величины не измерены прибором какого-то наблюдателя. С точки зрения Уилера, чтобы придать смысл квантовой механике, необходим какой-то тип разумной жизни. Недавно Уилер пошел еще дальше и высказал гипотезу, что разумная жизнь не только обязана была появиться, но должна продолжать распространяться на всю Вселенную, чтобы рано или поздно каждый бит информации о физическом состоянии Вселенной стал бы доступен наблюдению. Выводы Уилера представляются мне хорошим примером тех опасностей, которые связаны со слишком серьезным отношением к доктрине позитивизма, утверждающей, что наука должна иметь дело только с теми вещами, которые можно наблюдать. Другие физики, и я в том числе, предпочитают иную, реалистическую точку зрения на квантовую механику, основанную на понятии волновой функции, описывающей не только

196

атомы и молекулы, но и лаборатории, и наблюдателей в них, причем законы, которыми управляется эта функция, не зависят от существования наблюдателей.

Некоторые ученые придают особый смысл тому факту, что значения ряда фундаментальных констант кажутся специально подобранными для того, чтобы во Вселенной могла возникнуть разумная жизнь. До конца не ясно, есть ли что-то содержательное в этих наблюдениях, но даже если это так, отсюда нельзя сделать вывод о действии Божественной силы. В ряде современных космологических теорий так называемые константы природы (например, массы элементарных частиц) на самом деле меняются от места к месту или от одного момента времени к другому, более того, от одного слагаемого в волновой функции Вселенной к другому. Если это было бы так, то, как мы видели, все ученые, изучающие законы природы, должны были бы жить в той части Вселенной, где константы природы имеют значения, приемлемые для эволюции разумной жизни.

Приведем аналогию. Пусть существует планета Земля-штрих, во всех отношениях совпадающая с нашей Землей, кроме одного: человечество на этой планете развило физику, ничего не зная об астрономии. (Можно представить, например, что поверхность Земли-штрих всегда затянута облаками.) Студенты Земли-штрих, как и студенты Земли, имеют на обложках своих учебников таблицы физических констант. В них перечислены скорость света, масса электрона и т. д., а также еще одна «фундаментальная» константа, равная 1,99 калории в минуту на один квадратный сантиметр, выражающая количество энергии, достигающей поверхности Земли-штрих от некоторого неизвестного источника. На Земле эта константа называется солнечной постоянной, так как мы знаем, что эта энергия приходит от Солнца, но на Земле-штрих никто не может сказать, откуда берется эта энергия, и почему она имеет такое численное значение. Некоторые физики на Земле-штрих могут заметить, что наблюдаемое значение этой константы удивительным образом приспособлено к возникновению жизни. Если бы Земля-штрих получала много больше или много меньше энергии, чем 2 калории в минуту на один квадратный сантиметр, то вода в океанах была бы либо льдом, либо паром, так что на Земле-штрих не было бы воды или другой подходящей среды, в которой могла бы развиваться жизнь. Физик мог бы прийти к выводу, что эта константа — 1,99 калории в минуту на 1 см² — специально выбрана Богом для блага человечества. Более скептически настроенные физики на Земле-штрих доказывали бы, что все константы когда-нибудь найдут свое объяснение в окончательных законах физики, и что их приемлемость для существования жизни — просто случайность. На самом деле, и те, и другие были бы не правы. Когда обитатели Земли-штрих обрели бы наконец знание астрономии, они поняли бы, что их планета получает 1,99 калории в минуту на 1 см² просто потому, что

197

она, как и Земля, находится на расстоянии 150 миллионов километров от Солнца, излучающего за минуту $5,6 \cdot 10^{15}$ калорий тепловой энергии. Они поняли бы также, что есть и другие планеты, находящиеся ближе к Солнцу, на которых слишком жарко для существования жизни, и есть еще больше далеких планет, на которых слишком холодно, чтобы там могла существовать жизнь. Несомненно, существует еще бесчисленное количество планет, вращающихся вокруг других звезд, и только малая часть из них приспособлена для жизни. Узнав достаточно об астрономии, физики-скептики на Земле-штрих поняли бы наконец, что они живут в мире, получающем примерно 2 калории в минуту на 1 см², просто потому, что ни в одном другом мире они не могли бы жить. Мы в нашей части Вселенной напоминаем жителей Земли-штрих до того, как они открыли астрономию, только вместо других планет от нас скрыты другие части Вселенной.

Далее. Чем больше фундаментальных физических принципов мы открываем, тем меньшее отношение они к нам имеют. Например, в начале 1920-х гг. считалось, что единственными элементарными частицами являются электрон и протон, из которых состоим мы сами и весь мир. Когда были обнаружены новые частицы, скажем, нейтрон, то сначала думали, что они составлены из электронов и протонов. Сегодня все сильно изменилось. Мы совсем не уверены в том, что понимаем, что значит элементарность частицы, но уже выучили важный урок, что вхождение частиц в состав обычного вещества не имеет никакого отношения к тому, насколько они фундаментальны. Почти все частицы, чьи поля содержатся в уравнениях современной стандартной модели частиц и взаимодействий, так быстро распадаются, что они не могут находиться в составе обычного вещества и оказывать какое бы то ни было влияние на человеческую жизнь. Электроны являются существенной частью окружающего нас мира, а частицы, называемые мюонами и тау-лептонами, едва ли имеют отношение к нашим жизням, но в том виде, как это выглядит в наших теориях, электроны ни в коей мере не кажутся более фундаментальными,

чем мюоны или тау-лептоны. Можно высказать более общее утверждение: никто еще не обнаружил никакой корреляции между чем бы то ни было, что важно для нас, и тем, что важно для фундаментальных физических законов.

Конечно, большинство людей узнает что-то о существовании Бога не из научных открытий. Джон Полкингорн красноречиво доказывал, что теология «может найти свое место в той же части человеческого опыта, что и наука»²²⁶, и что она основана на религиозном опыте вроде откровения примерно так же, как наука основана на эксперименте и наблюдении. Те люди, которые думают, что обладают собственным религиозным опытом, должны сами для себя оценить качество этого опыта. Но большинство последователей мировых религий опираются не на собственный религиозный опыт, а на откровения, предположительно пережитые другими. Может показаться, что это

198

не слишком отличается от позиции физика-теоретика, опирающегося в работе на эксперименты, проделанные другими. Но есть очень важное отличие. Взгляды тысяч отдельных физиков складываются в удовлетворительное (хотя и неполное) общепринятое понимание физической реальности. Напротив, утверждения о Боге или о чем-то подобном, выводимые из религиозного откровения, совершенно не согласуются друг с другом. После тысяч лет теологического анализа мы не приблизились ни на шаг к единому пониманию уроков религиозного откровения.

Есть и еще одно отличие религиозного откровения от научного эксперимента. Уроки религиозного опыта могут приносить глубокое удовлетворение, по контрасту с абстрактным и внеличным взглядом на мир, получаемым от научного исследования. В противоположность науке, религиозный опыт может придать смысл нашим жизням, сделать нас участниками великой космической драмы греха и искупления и предложить нам обещание существования после смерти. Именно по этим причинам я вижу в уроках религиозного опыта несмыслимую печать стремления принять желаемое за действительное.

В моей книге «Первые три минуты», изданной в 1977 г., я был настолько неосторожен, что бросил фразу: «Чем более постижимой представляется Вселенная, тем более она кажется бессмысленной». Я имел в виду не то, что наука учит нас, будто Вселенная бессмысленна, а то, что сама Вселенная не указывает нам на смысл своего существования. Я поспешил добавить, что мы сами можем придать смысл своей жизни, в том числе, сделав попытку понять Вселенную. Но слово было сказано, и эта фраза с тех пор меня преследует²²⁷. Недавно Алан Лайтман и Роберта Бравер опубликовали интервью с двадцатью семью космологами и физиками²²⁸, почти каждому из которых в конце задавался вопрос, что они думают об этом замечании. С небольшими отклонениями десять из интервьюируемых согласились со мной, а тринадцать — нет. Однако из этих тринадцати трое выразили несогласие, так как вообще не поняли, почему кто-то должен *ожидать*, что во Вселенной должен быть смысл. Гарвардский астроном Маргарет Геллер задает вопрос: «Почему у нее должен быть смысл? Какой смысл? Я всегда удивлялась этому высказыванию». Астрофизик из Принстона Джим Пиблс замечает: «Меня заставляют поверить, что мы все — плавающие обломки какого-то кораблекрушения». (Пиблс также высказал гипотезу, что в тот день, когда я это писал, у меня было плохое настроение.) Еще один Принстонский астрофизик, Эдвин Тернер, согласился со мной, но предположил, что я сделал это замечание, чтобы подразнить читателя. Больше всего мне нравится ответ моего коллеги по Техасскому университету астронома Жерара де Вокулера. Он сказал, что мое замечание кажется ему «ностальгическим». Конечно, он прав — это ностальгия по миру, в котором небеса возглашают славу Божию.

199

Около полутора веков назад Мэтью Арнольд увидел в океанском отливе прекрасную метафору, описывающую угасание религиозного чувства, и услышал в звуках воды «ноту печали»²⁾. Было бы замечательно обнаружить в законах природы план, заготовленный заинтересованным Создателем, в котором человеческим существам отводилась бы специальная роль. Я испытываю печаль, когда высказываю сомнение в этом. Некоторые из моих ученых коллег утверждают, что познание природы дает им полное духовное удовлетворение, которое другие люди традиционно находят в вере в заинтересованного Бога. Возможно, что кто-то действительно так чувствует. Я — нет. И мне не поможет, если я по примеру Эйнштейна отождествлю законы природы с каким-то отстраненным и незаинтересованным Богом. Чем больше мы уточняем наши представления о Боге, чтобы сделать это понятие приемлемым, тем больше оно кажется бессмысленным.

Вероятно, я кажусь белой вороной среди современных ученых, когда проявляю интерес к подобным вещам. В тех редких случаях, когда за обедом или за чаем заходит разговор о религии, самая сильная реакция, которую выражает большинство моих коллег-физиков, увидев, что кто-то все еще способен серьезно обсуждать эти проблемы, — это тихое удивление и улыбка. Многие физики сохраняют номинальное уважение к вере своих родителей, как к форме этнической идентификации, а также как к обряду, полезному при свадьбах и похоронах, но мало кто из них уделяет внимание теологическим проблемам. Я знаком с двумя специалистами по общей теории относительности, являющимися набожными католиками, несколькими физиками-теоретиками, благоговейно относящимися к иудаизму, одним православным экспериментатором, одним теоретиком — убежденным приверженцем ислама и математиком, получающим указания свыше в англиканской церкви. Нет сомнения, что есть и много других глубоко религиозных физиков, с которыми я незнаком, или которые скрывают свои религиозные убеждения. Но, насколько я могу судить по собственным впечатлениям, большинство физиков сегодня интересуются религией недостаточно даже для того, чтобы их можно было считать действующими атеистами.

В определенном смысле религиозные либералы еще дальше отошли от ученых по духу, чем фундаменталисты и другие религиозные консерваторы. Последние, по крайней мере, утверждают, как и ученые, что они верят в то, во что они верят, потому что это правильно, а не потому что от этого становится легче и счастливее жить. В наши дни многие либералы от религии полагают, что разные люди могут верить в разные взаимоисключающие вещи, и все они правы, если только их верования «работают на них». Один верит в перерождение душ, другой — в рай и ад, третий — в то, что душа исчезает после

²⁾ Из стихотворения Мэтью Арнольда «Dover beach» («Дуврский берег»).

200

смерти; и ни про одного из них нельзя сказать, что он не прав, до тех пор, пока каждый получает духовное удовлетворение от своих верований. Как говорила Сьюзен Зонтаг, нас окружает «неопределенная набожность»¹²²⁹. Все это напоминает мне историю про Бертрана Рассела. В 1918 г. его осудили на тюремное заключение за антивоенную деятельность. Следуя принятым правилам, тюремщик спросил Рассела о его религии. Рассел ответил, что он агностик.

Тюремщик был немного озадачен, затем просиял и сказал: «Я понял. В конце концов все мы поклоняемся одному Богу не так ли?»

Как-то Вольфганг Паули спросили, не кажется ли ему, что одна запутанная научная статья просто ошибочна. Он ответил, что это определение слишком мягко — статья даже не ошибочна. Я полагаю, что религиозные консерваторы ошибаются в том, во что они верят, но по крайней мере они не забыли, что вообще означает вера во что-нибудь. Религиозные либералы, по-моему, даже не ошибаются.

Можно часто услышать, что в религии важна не теология, а то как религия помогает нам жить. Удивительно, что проблемы существования Бога, его природа, понятия благодати и греха, ада и рая, — все это оказывается неважным! Позволю высказать предположение, что люди считают богословские проблемы выбранной ими религии не столь важными, потому что не могут заставить себя признать, что они во все это верят. Однако на протяжении веков и сейчас в разных частях света люди разделяют те или иные богословские теории и считают их для себя очень важными.

Конечно, кого-то отталкивает интеллектуальная распушенность религиозного либерализма, но все же главная опасность таится в консервативной догматической религии. Безусловно, она также внесла огромный вклад в формирование моральных принципов и в искусство. Здесь не место обсуждать, как нам уравновесить на чашах весов этот вклад с одной стороны и долгую жестокую историю крестовых походов, джихада, инквизиции и погромов с другой. Мне хотелось бы только подчеркнуть, что подводя этот баланс, неправильно считать, что религиозные гонения и священные войны являются извращениями истинной веры. Такое предположение кажется мне симптомом широко распространенного отношения к религии, в котором соединяются глубокое уважение вместе с глубоким отсутствием интереса. Многие великие мировые религии учат, что Бог требует безоговорочной веры и определенного почитания. Неудивительно, что некоторые люди, воспринимающие всерьез эти учения, будут искренне считать божественные указания несравненно более важными, чем любые мирские добродетели вроде терпимости, сострадания или разума.

Темные силы религиозного фанатизма набирают силу по всей Азии и Африке, и даже в светских государствах Запада разум и терпимость подвергаются опасности. Историк Хью Тревор-Ропер заметил, что распространение духа науки в XVII и XVIII вв. привело в конце

201

концов к прекращению сжигания ведьм²³⁰. Возможно, нам следует опять обратиться к науке, чтобы сохранить мир разума. И главную роль здесь может сыграть не уверенность в научных знаниях, а их *неопределенность*. Когда мы видим ученых, все время меняющих свои взгляды на явления, которые можно изучать непосредственно в лабораторных экспериментах, как можем мы относиться серьезно к притязаниям религиозной традиции или священных книг на какое-то знание о вещах, недоступных человеческому опыту?

Конечно, наука внесла свой вклад в мировые проблемы, но, главным образом, дав нам средства для убийства друг друга, но не повод. Когда для оправдания совершаемых ужасов привлекали видных ученых, речь всегда шла о научных извращениях, вроде нацистского расизма или евгеники. Как сказал Карл Поппер, «достаточно очевидно, что не рационализм, а иррационализм ответственен за все жестокости национализма и агрессивность как до, так и после крестовых походов, однако я не знаю ни одной войны, которая велась бы с „научной“ целью и была бы инспирирована учеными»²³¹.

К сожалению, я не думаю, что можно с помощью рациональных аргументов овладеть научным способом мышления. Давно еще Дэвид Юм заметил²³², что, взывая к нашему прошлому опыту успешного использования научного мышления, мы предполагаем справедливость того самого способа мышления, который пытаемся проверить. Точно так же все логические аргументы могут быть опрокинуты простым отказом логически мыслить. Поэтому невозможно просто отбросить вопрос, почему, если мы не находим в законах природы желанного душевного покоя, мы не должны искать его где-нибудь еще — в том или ином духовном авторитете или, наоборот, в смене веры?

Решение о том, верить или не верить, не совсем полностью находится в наших руках. Может быть, я чувствовал бы себя счастливее и оказался бы лучше воспитан, если бы думал, что происхожу от китайских императоров, но никаким усилием воли я не могу заставить себя поверить в это, точно так же, как не могу заставить остановиться свое сердце. Иногда кажется, что многие люди способны осуществлять контроль над тем, во что они верят, и сами выбирают, какая вера принесет им больше счастья или удачи. Самое интересное описание того, как этот контроль может действовать, можно встретить в романе Джорджа Оруэлла «1984». Герой романа, Уинстон Смит, записывает в своем дневнике, что «свобода означает свободу говорить, что два плюс два равно четырем». Инквизитор О' Брайен воспринимает это как вызов и ставит задачу заставить Смита изменить свое мнение. Под пыткой Смит, конечно, готов сказать, что два плюс два равно пяти, но не к этому стремится О' Брайен. В конце концов, боль становится такой невыносимой, что с целью избавиться от нее Смит заставляет себя поверить, что два плюс два равно пяти. На время О' Брайен удовлетворен, и пытка прекращается. Во многом похожим

202

образом боль от столкновения с перспективой нашей собственной смерти и смерти тех, кого мы любим, заставляет нас выбрать ту веру, которая смягчает эту боль. Если мы способны таким образом настроить наши верования, то почему бы этим не воспользоваться?

Я не вижу никаких научных или логических оснований не искать утешения путем настройки наших верований: такие основания связаны только с моралью или чувством чести. Что бы мы подумали о человеке, который сумел убедить себя, что он обязательно должен выиграть в лотерею, поскольку страшно нуждается в деньгах? Кто-то может поддержать его большие ожидания, но большинство будет думать, что этот человек не оправдывает своей роли взрослого, рационально мыслящего человеческого существа, способного трезво глядеть в лицо действительности. Подобно тому, как каждый из нас с возрастом учится преодолевать искушение серьезно относиться к таким вещам, как лотереи, все мы должны постепенно понять, что мы не являемся звездами в какой-то великой космической драме.

Тем не менее, я ни в коем случае не думаю, что наука когда-либо подарит такое же утешение перед лицом смерти, какое дает вера. Наилучшее известное мне изложение этого экзистенциального выбора можно найти в «Церковной истории Англии» I²³³, написанной Бедой Достопочтенным примерно в 700 г. н. э. Беда рассказывает, как король Англии Эдвин

Нортумбрийский собрал в 627 г. совет, чтобы решить, какую религию принять подданным его страны, и приводит следующую речь одного из приближенных короля:

«Ваше Величество, когда мы сравниваем теперешнюю жизнь человека на Земле с той, о которой мы ничего не знаем, она представляется мне быстрым полетом одинокого воробушка через банкетный зал, где Вы пируете зимним днем вместе со своими танами и советниками. Посередине уютно горит огонь, обогревающий зал, а снаружи бушует ветер и валит снег. Этот воробушек влетает в одну дверь зала и вылетает в противоположную. Пока он внутри, он в безопасности от зимних штормов, но после нескольких мгновений уюта он исчезает из виду в снежных вихрях, из которых только что появился. Точно так же и человек ненадолго появляется на Земле. Но о том, что предшествовало его жизни, или что будет после нее, мы не знаем ничего...»

Почти непреодолимо искушение поверить вместе с Бедой и королем Эдвином, что за стенами банкетного зала должно быть еще что-то для нас. Честь противостоять этому искушению — всего лишь крохотный противовес утешению в вере, но и само это противостояние иногда приносит удовлетворение.

ГЛАВА XII. В округе Эллис

Мамы, не давайте своим детям вырастать ковбоями,

Не разрешайте им брэнчать на гитарах и водить старые грузовики. Пусть лучшие из них выйдут доктора и адвокаты.

Эд и Петси Брюс

Округ Эллис штата Техас находится в сердце региона, который когда-то был величайшей областью, где выращивали хлопок, на планете. В главном городе округа Ваксахачи нетрудно заметить следы бывшего хлопкового процветания. В центре города возвышается построенное в 1895 г. громадное здание из розового гранита с высокой часовой башней — помещение окружной администрации. От центральной площади веером расходятся несколько улиц, застроенных прелестными домами в викторианском стиле, выглядящими так, будто Браттл Стрит перенеслась из Кембриджа на юго-запад. Но сейчас округ сильно обеднел. Хотя в небольшом количестве хлопок выращивается и сейчас, так же как пшеница и кукуруза, но цены уже не те. В сорока минутах езды по шоссе к северу находится Даллас, и несколько преуспевающих жителей этого города переселились в свое время в Ваксахачи в поиске сельской тишины и покоя. Однако быстро растущие в Далласе и Форт Уорте авиационная промышленность и производство компьютеров до округа Эллис не добрались. В 1988 г. число безработных в Ваксахачи составляло 7 %. Неудивительно, что в администрации округа поднялся большой переполох, когда 10 ноября 1988 г. было объявлено, что округ Эллис избран местом строительства самого большого и самого дорогого научного прибора в мире — Сверхпроводящего суперколлайдера (ССК).

Проектирование ССК началось за шесть лет до этого. В то время министерство энергетики занималось хлопотным проектом под названием ИЗАБЕЛЛА, который уже находился в стадии строительства

204

в Брукхейвенской национальной лаборатории на Лонг Айленде. Предполагалось, что ускоритель ИЗАБЕЛЛА станет наследником существующего ускорителя в Лаборатории им. Ферми (Фермилабе) под Чикаго, в качестве ведущего американского центра экспериментальных исследований по физике элементарных частиц. Начавшись в 1978 г., строительство ускорителя ИЗАБЕЛЛА сразу же затормозилось на два года из-за проблем с конструкцией сверхпроводящих магнитов, которые должны были удерживать на орбите сфокусированный протонный пучок. Но была и другая, более глубокая проблема, связанная с этим проектом. Хотя после окончания строительства этот ускоритель стал бы самым мощным в мире, все же его мощности не хватало на то, чтобы ответить на вопрос, ответ на который страстно желали получить все физики: как нарушается симметрия между слабым и электромагнитным взаимодействиями?

Описание слабых и электромагнитных взаимодействий в рамках стандартной модели элементарных частиц основано на *точной* симметрии, подчиняясь которой эти взаимодействия входят в уравнения теории. Однако, как мы видели, эта симметрия отсутствует в решениях уравнений, т. е. свойствах самих частиц и взаимодействий. Любая версия стандартной модели, допускающая такое нарушение симметрии, должна обладать свойствами, которые еще не обнаружены экспериментально — должны существовать либо новые слабозадействующие частицы, называемые *хиггсовскими частицами*, либо новые сверхсильные взаимодействия. Мы не знаем, какой из вариантов реально осуществляется в природе, поэтому такая неопределенность препятствует продвижению за рамки стандартной модели.

Единственным надежным способом разрешения этого вопроса является эксперимент, в котором есть возможность потратить триллионы электрон-вольт, чтобы породить либо хиггсовские частицы, либо массивные частицы, удерживаемые вместе сверхсильными взаимодействиями. Оказывается, что для этого необходимо довести полную энергию пары сталкивающихся протонов до 40 триллионов эВ, так как энергия каждого протона делится между входящими в его состав кварками и глюонами, и только примерно одна сороковая доля полной энергии может быть использована для рождения новых частиц в процессе соударения любого кварка или глюона из одного протона с кварком или глюоном из другого. Однако недостаточно просто выстрелить пучком протонов энергией 40 триллионов эВ по неподвижной мишени, так как тогда почти вся энергия налетающих протонов будет растратчена на отдачу протонов мишени. Чтобы надежно решить вопрос о нарушении электрослабой симметрии, необходимы два пучка протонов энергией 20 триллионов эВ, которые сталкивались бы лоб в лоб, так что суммарный импульс двух столкнувшихся протонов был бы равен нулю и не было бы никаких потерь энергии на отдачу. К счастью, можно быть уверенными в том, что ускоритель, на кото-

205

ром интенсивные встречные пучки протонов ускоряются до энергии 20 триллионов эВ, способен разрешить проблему нарушения электрослабой симметрии, т. е. на нем будет обнаружена либо хиггсовская частица, либо свидетельства новых сильных взаимодействий.

В 1982 г. среди физиков — теоретиков и экспериментаторов — начала бродить идея, что проект ИЗАБЕЛЛА должен быть отброшен за ненадобностью, и его следует заменить постройкой значительно более мощного нового ускорителя, в опытах на котором можно было бы разрешить проблему нарушения электрослабой симметрии. Тем летом состоялось первое заседание неофициальной рабочей группы Американского физического общества, на котором впервые детально рассматривался проект ускорителя на сталкивающихся протонных пучках с энергиями по 20 триллионов эВ, т. е. в пятьдесят раз больше, чем планировалось в проекте ИЗАБЕЛЛА. В феврале следующего года подкомитет Консультативного комитета по физике высоких энергий Министерства энергетики под председательством Стенли Вожички начал серию встреч, на которых обсуждались параметры ускорителя нового поколения. Члены подкомитета встретились в Вашингтоне с советником президента по науке Джейм Кейвортом и получили от него твердые заверения, что администрация благожелательно отнесется к новому большому проекту.

Подкомитет Вожички провел свое решающее заседание в период с 29 июня по 1 июля 1983 г. в Циклотронной лаборатории им. Невиса Колумбийского университета в округе Вестчестер. Приглашенные физики единогласно рекомендовали построить ускоритель, который мог бы ускорять встречные пучки протонов до энергий 10—20 триллионов эВ. Само по себе это голосование не должно было привлечь особое внимание. Ученые в любой области высказывают рекомендации по созданию нового оборудования для своих исследований. Значительно важнее было то, что десятью голосами против семи было рекомендовано прекратить работы по проекту ИЗАБЕЛЛА. Это было невероятно трудное

решение, против которого яростно возражал директор Брукхейвена Ник Самиос. (Позднее Самиос назвал это голосование «одним из самых тупых решений, когда-либо принятых в физике высоких энергий»²³⁴.) Решение не только подчеркнуло поддержку подкомитетом проекта нового большого ускорителя, оно политически чрезвычайно затруднило для Министерства энергетики обращение к конгрессу с просьбой о продолжении финансирования проекта ИЗАБЕЛЛА, а если этот проект приостанавливался и не заменялся никаким другим, то получалось, что министерство энергетики вообще остается без проектов строительства установок по физике высоких энергий.

Десятью днями спустя рекомендации подкомитета Вожички были единогласно поддержаны головным консультативным комитетом по физике высоких энергий министерства энергетики. Именно в это время предлагаемый новый ускоритель получил свое теперешнее имя:

206

Сверхпроводящий СуперКоллайдер (ССК) (по-англ. Superconducting Supercollider, SSC. — Прим. перев.). 11 августа 1983 г. министерство энергетики поручило консультативному комитету по физике высоких энергий наметить план проведения исследовательских и конструкторских работ, необходимых для проекта ССК, а 16 ноября 1983 г. министр энергетики Дональд Ходель объявил решение министерства о прекращении работы над проектом ИЗАБЕЛЛА²³⁵ и обратился к соответствующим комитетам палаты представителей и сената за разрешением направить выделенные на проект ИЗАБЕЛЛА средства на новый проект ССК.

Поиск механизма нарушения электрослабой симметрии безусловно был не единственным доводом в пользу ССК. Обычно при строительстве новых ускорителей типа находящихся в ЦЕРНе или Фермилабе всегда ожидается, что при переходе к более высокому уровню энергий будут обнаружены новые выдающиеся явления. Такие ожидания почти всегда оправдывались. Например, при строительстве старого протонного синхротрона в ЦЕРНе не было никаких определенных идей относительно того, что на нем будет открыто. Безусловно, никто не предвидел, что эксперименты с полученными на этом ускорителе нейтринными пучками приведут к открытию в 1973 г. слабых взаимодействий нейтральных токов, подтвердивших единую теорию электрослабых взаимодействий. Сегодняшние большие ускорители являются потомками циклотронов, построенных в начале 1930-х гг. в Беркли Эрнстом Лоуренсом с целью ускорения протонов до столь высоких энергий, чтобы они смогли преодолеть электрическое отталкивание протонов атомного ядра. При этом у Лоуренса не было никаких идей о том, что может быть обнаружено, когда протоны проникнут вглубь ядра. Бывает и так, что определенное открытие анонсируется заранее. Например, построенный в конце 1950-х гг. бэватрон в Беркли был специально рассчитан на такую энергию (примерно 6 ГэВ), чтобы появилась возможность рожать антипротоны — античастицы протонов, входящих в состав всех обычных атомных ядер. Работающий в наши дни электрон-позитронный коллайдер в ЦЕРНе был построен в первую очередь так, чтобы энергия пучков была достаточной для рождения очень большого количества Z -частиц, которые затем использовались для того, чтобы подвергнуть теорию электрослабых взаимодействий жесткой экспериментальной проверке. Но даже тогда, когда постройка нового ускорителя мотивируется какой-то определенной задачей, наиболее важные открытия на нем происходят совершенно неожиданно. Именно так было с бэватроном в Беркли. Антипротоны на нем действительно были получены, но самым главным достижением стало рождение большого числа неожиданных новых сильновзаимодействующих частиц. Точно так же, с самого начала подчеркивалось, что эксперименты на Суперколлай-

207

дере могут привести к значительно более важным открытиям, чем подтверждение механизма нарушения электрослабой симметрии.

Опыты на ускорителях сверхвысоких энергий типа ССК могут даже решить самую важную проблему, с которой столкнулась современная физика, — проблему недостающей темной материи. Нам известно, что большая часть массы галактик, и еще большая часть массы скоплений галактик является темной, т. е. не состоит из светящихся звезд типа Солнца. Еще больше темной материи требуется для того, чтобы объяснить скорость расширения Вселенной в рамках популярных космологических теорий. Такой избыток темной материи не может существовать в форме обычных атомов. Если бы это было так, то существование дополнительного большого числа протонов, нейтронов и электронов повлияло бы на расчеты распространенности легких элементов, образованных в первые несколько минут расширения Вселенной, так что результаты этих расчетов перестали бы согласовываться с наблюдениями.

Так что же такое темная материя? В течение многих лет физики строят предположения о существовании экзотических частиц того или иного сорта, из которых могла бы состоять темная материя. Однако до сих пор эти гипотезы не привели к определенным результатам. Если в экспериментах на ускорителе будет обнаружен новый тип долгоживущих частиц, то, измерив их массу и взаимодействия, мы сумеем вычислить, сколько таких частиц осталось после Большого взрыва, и решить, могут ли они составлять всю или только часть темной материи во Вселенной.

Недавно эти вопросы обострились в результате наблюдений, сделанных спутником COBE (Cosmic Background Explorer). Помещенные на этом спутнике чувствительные приемники микроволнового излучения обнаружили следы ничтожных различий температуры этого излучения при переходе от одной части неба к другой. Эти различия сохранились от эпохи, когда возраст Вселенной был равен всего тремстам тысячам лет. Считается, что такие неоднородности температуры возникли за счет влияния гравитационных полей, созданных слегка неоднородным распределением материи в ту эпоху. Момент времени через триста тысяч лет после Большого взрыва имел решающее значение в истории Вселенной. Она впервые стала прозрачной для излучения, и обычно считается, что неоднородности в распределении материи начали после этого момента собираться в комки под действием собственного притяжения, что привело в конце концов к образованию тех галактик, которые мы видим на небе. Однако неоднородности в распределении материи, вытекавшие из результатов измерений COBE, не соответствуют *молодым* галактикам. Дело в том, что спутник COBE изучал только нерегулярности очень большого размера, значительно превышавшего тот, который имели сегодняшние галактики в момент времени через триста тысяч лет после Большого взрыва.

208

Если экстраполировать то, что наблюдал COBE, к много меньшим размерам ранних галактик, и вычислить степень неоднородности вещества на этих сравнительно малых масштабах, то мы столкнемся с проблемой: неоднородности размером с теперешнюю галактику были бы слишком незначительны в эпоху через триста тысяч лет после начала, чтобы

вырасти под действием собственной гравитации в сегодняшние галактики. Один из способов преодолеть возникшую проблему заключается в том, чтобы предположить, что неоднородности галактического размера начали гравитационное сжатие уже в первые триста тысяч лет, так что экстраполяция того, что наблюдает COBE, к много меньшим размерам галактик неверна. Однако это невозможно, если вещество Вселенной состоит главным образом из обычных протонов, нейтронов и электронов, так как неоднородности такой обычной материи не могут испытать существенный рост, пока Вселенная не станет прозрачной для излучения. Просто, в более ранние моменты времени любой комок вещества будет разнесен на куски давлением собственного излучения. С другой стороны, экзотическая темная материя²³⁶, состоящая из электрически нейтральных частиц, стала бы прозрачной для излучения намного раньше, и поэтому начала бы гравитационное сжатие в эпоху намного ближе к началу, образуя значительно более сильные неоднородности галактических масштабов, чем те, которые вытекают из экстраполяции данных COBE, и, вероятно, достаточные для того, чтобы вырасти в сегодняшние галактики. Открытие частиц темной материи на ССК подтвердило бы это предположение, пролив, тем самым, свет на раннюю историю Вселенной.

Существует множество других новых явлений, которые могли бы быть исследованы на ускорителях типа ССК: частицы, из которых состоят кварки внутри протонов, любые из множества суперпартнеров известных частиц, требуемых теорией суперсимметрии, новые типы взаимодействий, связанные с новыми внутренними симметриями и т. п. Мы не знаем, существуют ли перечисленные частицы и явления, и если они существуют, могут ли они быть открыты на ССК. Поэтому ободряющим является уже то, что мы заранее знаем по крайней мере об одном открытии огромного значения, которое можно совершить на ССК, — установлении механизма нарушения электрослабой симметрии.

После того, как министерство энергетики приняло решение о строительстве ССК, несколько лет ушло на планирование и проектирование, прежде чем смогло начаться само строительство. На основании давнего опыта известно, что хотя такое предприятие и спонсируется федеральным правительством, руководство им лучше всего осуществляется частными агентствами, поэтому министерство энергетики передало управление исследовательскими и конструкторскими работами университетской исследовательской ассоциации, некоммерческому консорциуму из шестидесяти девяти университетов, уже

руководившему в свое время постройкой Лаборатории им. Ферми. Ассоциация в свою очередь привлекла университетских специалистов и ученых из промышленности в совет наблюдателей за постройкой ССК. Этот совет передал полномочия по детальной разработке конструкции ускорителя центральной конструкторской группе в Беркли, которую возглавил Маури Тайгнер из Корнеллского университета. К апрелю 1986 г. центральная конструкторская группа завершила проектирование. Ускоритель должен был представлять собой туннель диаметром три метра, образующий овал длиной 83 км, в котором должны были ускоряться летящие в противоположных направлениях два тоненьких протонных пучка энергией 20 триллионов электронвольт. Протоны удерживались на своей траектории 3 840 отклоняющими магнитами (длиной 17 м каждый) и фокусировались другими 888 магнитами. В целом, на все магниты должно было уйти 41 500 т железа и 19 400 километров сверхпроводящего кабеля. Они должны были охлаждаться 2 миллионами литров жидкого гелия.

30 января 1987 г. проект был одобрен Белым домом. В апреле министерство энергетики приступило к поиску места строительства, обратившись с просьбой к заинтересованным штатам высказывать свои предложения. К установленному сроку, 2 сентября 1987 г., оно получило сорок три предложения (общее число документов весило около 3 т) от штатов, желавших осуществить проект ССК на своей территории. Комитет, назначенный национальными академиями науки и техники, уменьшил число заявок до семи «лучше всего обоснованных» мест, и, наконец, 10 ноября 1988 г. министр энергетики объявил решение министерства: ССК будет построен в округе Эллис, Техас.

Отчасти, причина этого выбора лежит глубоко под поверхностью Техаса. На север от Остина до Далласа тянется геологическая формация возрастом 84 млн лет, известная как Остинское меловое отложение. Оно возникло из осадочных пород на дне моря, покрывавшего большую часть Техаса в меловом периоде. Мел непроницаем для воды, достаточно мягок для рытья, и в то же время, достаточно тверд для того, чтобы не было необходимости дополнительно укреплять стены туннеля. Трудно было бы найти более удачный материал, в котором предстояло прорыть туннель ССК.

Тем временем только разворачивалась борьба за финансирование ССК. Критическим для такого рода проектов является первое ассигнование на строительство. До этого момента проект состоит только из исследовательских и конструкторских работ, которые могут быть остановлены так же легко, как были начаты. Но как только начинается само строительство, остановить его политически неудобно, так как остановка означает молчаливое признание, что все деньги, уже потраченные на строительство, выброшены на ветер. В феврале 1988 г. президент Рейган запросил конгресс о выделении 363 млн долларов на строительство, но конгресс выделил только 100 млн и специально

позволил тратить эти средства только на разработку и конструирование, но не на строительство.

Проект ССК продолжался так, как будто его будущее было обеспечено. В январе 1989 г. была избрана техническая администрация, и директором лаборатории ССК стал Рой Швиттерс. Этот бородатый, но сравнительно молодой физик-экспериментатор, которому исполнилось тогда 44 года, уже доказал свои способности управленца, возглавляя главную экспериментальную группу на ведущей в США установке по физике высоких энергий — коллайдере Тэватрон в Лаборатории им. Ферми. 7 сентября 1989 г. появились хорошие новости: сенатский комитет согласился ассигновать 225 млн долларов в 1990 бюджетном году, причем 135 млн предназначалось на строительство. Проект ССК наконец-то выходил из стадии исследований и конструирования.

Но борьба не закончилась. Каждый год администрация ССК ставила перед конгрессом вопрос о финансировании, и каждый год произносились одни и те же аргументы за и против²³⁷. Только очень наивный физик удивился бы, насколько далеки эти споры от нарушения электрослабой симметрии или окончательных законов природы. Но только очень циничный физик не был бы огорчен самим фактом этих споров.

Единственный самый сильный фактор, заставлявший политиков поддерживать или отвергать ССК, состоял в сиюминутных экономических интересах их избирателей. Гроза проекта в конгрессе, член палаты представителей Дон Риттер сравнил ССК с «казенным пирогом», который некоторые влиятельные конгрессмены поддерживают только из политических соображений. Прежде чем было выбрано место строительства ССК, со стороны тех, кто надеялся, что выбор падет на его

штат, была широкая поддержка проекта. Когда я в 1987 г. выступал в поддержку проекта перед сенатским комитетом, один из сенаторов заметил мне, что сейчас ССК поддерживают около сотни сенаторов, но после того, как будет объявлено место строительства, их останется только два. Конечно, поддержка сократилась, однако оценка сенатора была чересчур пессимистичной. Возможно, это связано с тем, что компании по всей стране получили контракты на компоненты ССК, но я полагаю, что это отражает и определенное понимание важности проекта как такового.

Многие оппоненты ССК указывают на срочную необходимость сократить дефицит федерального бюджета. Это было постоянной темой выступлений сенатора Дейла Бамперса из Арканзаса, главного оппонента ССК в сенате. Я могу понять эту озабоченность, но не понимаю, почему начинать сокращение дефицита нужно именно с исследований на переднем крае науки. Можно подумать о многих других проектах — от космической станции до подводной лодки «Морской волк» — стоимость которых много больше, чем у ССК, но внутренняя ценность намного меньше. Может быть, мы должны продолжать дру-

211

гие проекты из-за желания сохранить рабочие места? Однако деньги, потраченные на ССК, обеспечивают такое же количество рабочих мест, как и любой другой проект. Может быть, не будет слишком циничным предположение, что проекты типа космической станции или подводной лодки слишком хорошо политически защищены сетью аэрокосмических и оборонных компаний, так что ССК остается самой уязвимой мишенью для чисто символического акта сокращения дефицита бюджета.

Одной из постоянных тем в дебатах по поводу ССК было противостояние так называемых большой науки и малой науки. Проект ССК вызвал противодействие со стороны ряда ученых, предпочитающих старый и более скромный стиль научного исследования — эксперименты, проводимые профессором и его студентом в комнатке университетского корпуса. Многие из тех, кто работает в современных гигантских ускорительных лабораториях, тоже предпочли бы физику такого рода, однако, в результате прошлых достижений мы столкнулись с проблемами, которые просто невозможно решить с помощью резерфордовских нитки и сургуча. Я понимаю, что многие авиаторы с грустью вспоминают те дни, когда кабины самолетов были открытыми, однако, таким способом не пересечешь Атлантику.

Противодействие проектам «большой науки» типа ССК исходит и от ученых, которые хотели бы потратить деньги на другие исследования (например, свои собственные). Но я думаю, что они сами себя обманывают. Когда конгресс урезал запрос администрации на проект ССК, освободившиеся деньги были направлены не на науку, а на проекты в гидроэнергетике²³⁸. Многие из этих проектов являются чистой «кормушкой», и, по сравнению с их стоимостью, средства, потраченные на ССК, являются ничтожными.

ССК также вызвал противодействие тех, кто подозревал, что решение президента Рейгана о его строительстве относилось к тому же типу, что и поддержка проекта противоракетных систем в рамках «звездных войн» и проекта космической станции — этакий бездумный энтузиазм по поводу любого нового большого инженерного проекта. С другой стороны мне кажется, что противодействие ССК у многих коренится и в столь же бездумном отвращении к любому новому большому технологическому проекту. Журналисты регулярно смешивали в одну кучу ССК вместе с космической станцией как ужасные примеры большой науки, несмотря на то, что космическая станция вообще не относится к научным проектам. Противопоставление большой науки и малой науки — хороший способ избежать необходимости обдумывать ценность отдельных проектов.

Определенная важная поддержка проекта ССК была высказана теми, кто рассматривали этот проект, как своего рода индустриальную теплицу, которая ускорит прогресс различных важнейших технологий: криогеники, создания магнитов, работы компьютеров он-лайн

212

и т. п. ССК представлял бы также интеллектуальный ресурс, который мог бы помочь нашей стране увеличить число исключительно одаренных специалистов. Без ССК мы потеряем поколение физиков — специалистов в области физики высоких энергий, которым придется заниматься своими исследованиями в Европе или Японии. Даже те, кто не задумываются об открытиях, сделанных этими физиками, могут понять, что такое сообщество представляет сокровищницу научных талантов, хорошо послуживших нашей стране, начиная с Манхэттенского проекта в прошлом, и заканчивая нынешними исследованиями по параллельному программированию суперкомпьютеров.

Это хорошие и важные доводы для членов конгресса в пользу поддержки проекта ССК, но они не трогают сердце физика. Наше настойчивое желание увидеть ССК завершенным связано с ощущением, что без этого нам, возможно, не удастся продолжить великое интеллектуальное приключение — поиск окончательных законов природы.

* * *

Поздней осенью 1991 г. я отправился в округ Эллис, чтобы посмотреть на место строительства ССК. Как и в большей части этого района Техаса, земля представляла собой слегка холмистую равнину с бесчисленным числом речушек, вдоль которых стояли трехгранные тополя. В это время года земля выглядела некрасиво: главная часть урожая была уже собрана, и поля, подготовленные для озимой пшеницы, выглядели как сплошная грязь. Только в отдельных местах, где сбор урожая задержался из-за недавних дождей, поля еще белели от хлопка. В небе патрулировали орлы в надежде схватить собирающую колоски мышь. Это не ковбойская страна. В поле я увидел кучку сгрудившихся черных коров и одну белую лошадь. Стада, которые заполняют скотопригонные дворы Форт Уорта, главным образом гонят с ранчо, находящихся далеко на северо-запад от округа Эллис. По дороге к будущему городку ССК хорошие федеральные шоссе типа ферма—рынок постепенно переходят в немощенные окружные дороги, мало чем отличающиеся от грязных дорог, служивших местным хлопководам еще сто лет назад.

Я понял, что доехал до того участка, который был куплен штатом Техас для городка ССК, когда стал встречать забитые досками фермерские дома, ожидающие сноса или перевозки. Примерно в миле к северу можно было увидеть грандиозное новое здание корпуса разработки магнитов. Затем, за молодой дубовой рощицей я увидел высокую буровую установку, которую привезли с нефтяных месторождений на берегу Мексиканского залива, с целью пробурить пробный тоннель шириной 5 м на глубину 80 м до основания остинского мелового отложения. Я подобрал кусочек мела, который добыл бур, и подумал о Томасе Хаксли.

Несмотря на продолжающееся строительство всех зданий и бурение тоннеля, я знал, что финансирование проекта может быть прекращено. Мысленно я мог представить себе, как будут засыпать пробные тоннели и опустеет здание магнитного корпуса, и только у нескольких фермеров останутся постепенно слабеющие воспоминания об огромной научной лаборатории, которую планировали построить в округе Эллис. Возможно, что я находился под влиянием викторианского оптимизма Хаксли, но я не мог поверить, что это случится, или что поиск окончательных законов природы в наши дни будет прекращен.

Никто не может сказать, с помощью какого ускорителя мы сделаем последний шаг к окончательной теории. Я твердо знаю, что эти машины являются необходимым звеном в исторической цепочке великих научных приборов: от сегодняшних ускорителей в Брукхевене, ЦЕРНе, ДЕЗИ, Фермилабе, КЕК и СЛАК к циклотрону Лоуренса, катодной трубке Томсона и еще дальше вглубь времен к спектро스코пу Фраунгофера и телескопу Галилея. Будут ли открыты окончательные законы при нашей жизни или нет, все равно замечательно, что мы продолжаем традицию подвергать природу экзамену, вновь и вновь спрашивая, почему все устроено так, как оно есть.

Послесловие ко второму изданию книги. Суперколлайдер один год спустя

Как раз тогда, когда второе издание этой книги ушло в печать в октябре 1993 г., палата представителей проголосовала за прекращение программы строительства Сверхпроводящего суперколлайдера. Хотя в прошлом после таких голосований программу удавалось спасти, похоже, на этот раз решение окончательное. Несомненно, что в ближайшие годы политологи и историки науки не останутся без работы, анализируя это решение, но думаю, что мои комментарии по поводу того, как и почему это случилось, не будут выглядеть слишком поспешными.

24 июня 1993 г. палата представителей повторила свое решение 1992 г. и проголосовала за изъятие финансирования ССК из законопроекта по финансированию энергетики и гидроэнергетики. Это решение не уменьшало финансирование энергетики и не предусматривало увеличение поддержки других областей науки. Просто те суммы, которые предназначались для ССК, стали доступными для поддержки других энергетических проектов. Теперь спасти лабораторию могло только положительное голосование в сенате.

И снова физики из всех уголков США забросили свои письменные столы и лаборатории и собрались летом в Вашингтоне, чтобы лоббировать проект строительства ССК. Театральной кульминацией борьбы за выживание ССК стали дебаты в сенате 29 и 30 сентября 1993 г. Наблюдая за дебатами, я испытывал сюрреалистические ощущения, слушая, как сенаторы в своих выступлениях спорят о существовании хиггсовских бозонов и цитируют в подкрепление своих слов эту книгу. Наконец, 30 сентября сенат 57 голосами против 42 решил продолжить финансирование ССК в полном объеме (\$ 640 млн) в соответствии с запросом администрации. Это решение было затем поддержано согласительной комиссией палаты представителей и сената, однако 19 октября палата почти двумя третями голосов отклонила доклад согласительной комиссии и вернула закон о финансировании энергетики в комитет с инструкциями изъять из него финансирование ССК. После этого комитет на своем заседании решил остановить проект.

Почему это произошло? Очевидно, что речь не шла о каких-то трудностях, с которыми столкнулась программа ССК. За тот год, который прошел с момента написания этой книги, под поверхностью округа Эллис в остинских меловых отложениях уже было пройдено

215

25 км главного туннеля. Завершено здание и частично установлено оборудование линейного ускорителя, первого из серии ускорителей, которые должны разогнать протоны перед началом их пути внутри Суперколлайдера. Завершена работа над 570-метровым туннелем для бустера низких энергий, который должен ускорять поступившие из линейного ускорителя протоны до энергии 12 ГэВ прежде чем запустить их в бустер средних энергий. (По современным стандартам такие энергии кажутся маленькими, но когда я начинал свою работу в физике, энергия 12 ГэВ была недоступна ни одной лаборатории мира.) В Луизиане, Техасе и Вирджинии были построены заводы для массового производства магнитов, которые должны отклонять и фокусировать протоны во время их полета внутри трех бустеров и основного 83-километрового кольца. Рядом с лабораторией разработки магнитов, которую я посетил в 1991 г., появились другие строения — лаборатория тестирования магнитов, лаборатория тестирования ускорительных систем и здание, в котором должны были помещаться огромные холодильные установки и компрессоры для жидкого гелия, необходимого для охлаждения сверхпроводящих магнитов основного кольца. Одна экспериментальная программа — плод труда более тысячи квалифицированных ученых из двадцати четырех стран — была предварительно одобрена, другая близка к завершению.

Не произошло и никаких открытий в области физики элементарных частиц, которые ослабили бы доводы в пользу строительства ССК. Мы все еще безуспешно пытаемся выйти за рамки стандартной модели. Без ССК единственной надеждой остается то, что физики Европы продвинутся вперед со своими проектами и построят аналогичный ускоритель.

Проблемы ССК частично были побочным эффектом не имеющих отношения друг к другу политических веяний. Президент Клинтон продолжал поддерживать проект ССК со стороны администрации, однако, его политическая поддержка была существенно слабее, чем у президента Буша из Техаса, или у президента Рейгана, при котором проект начался. Возможно, самое главное состояло в том, что многие члены конгресса (особенно новые) ощущали необходимость продемонстрировать свою бережливость, проголосовав против финансирования *хоть чего-нибудь*. Стоимость проекта ССК составляет 0,043 % федерального бюджета, однако проект является удобным политическим символом.

В дебатах по ССК чаще всего звучала нота озабоченности приоритетами. Это действительно серьезный вопрос. Всегда очень трудно тратить деньги на другие дела, видя, как некоторые наши граждане недоедают и не имеют крыши над головой. Но некоторые члены конгресса отмечали, что те преимущества, которые в перспективе получит наше общество, поддерживая фундаментальную науку, перевешивают любой сиюминутный выигрыш, который может быть

216

получен на те деньги, о которых идет речь. С другой стороны, многие члены конгресса, энергично ставившие под сомнение финансирование ССК, регулярно голосовали за другие, значительно менее важные проекты. Более крупные проекты, например космическая станция, пережили этот год не из-за их внутренней ценности, а из-за того, что так много избирателей членов конгресса экономически заинтересованы в этих программах. Возможно, что если бы Суперколлайдер стоил вдвое дороже и обеспечивал вдвое большее число рабочих мест, он бы проскочил легче.

Оппоненты ССК выдвигали обвинения в плохом управлении и безудержно растущей стоимости проекта. На самом деле никаких признаков плохого управления не было, а причиной роста расходов почти всегда были задержки финансирования со стороны правительства. Я утверждал это, давая показания в сенатском комитете по энергетике и естественным ресурсам в августе 1993 г. Но лучшим ответом на эти обвинения было сделанное в августе заявление министра энергетики О'Лири, что после израсходования 20% от полной стоимости проект готов ровно на 20 %.

Некоторые члены конгресса доказывали, что, несмотря на научную ценность ССК, мы просто не можем позволить себе осуществить его сейчас. Но когда бы ни начал осуществляться проект таких масштабов, в течение тех лет, которые уйдут на его осуществление, обязательно найдется период, когда с экономикой будут неладить. Что же нам делать: не начинать вообще больших проектов, или прерывать их, как только в экономике намечается спад? После того, как мы списываем в корзину два миллиарда долларов и десять тысяч человеко-лет, уже вложенных в ССК, какие ученые или какое иностранное

правительство захотят в будущем участвовать в любом подобном проекте, который может быть прерван, как только с экономикой опять что-то не так? Очевидно, что любая программа должна пересматриваться, если к этому вынуждают изменения в науке или технологии. Ведь именно физики — специалисты в области высоких энергий — взяли на себя инициативу по закрытию последнего проекта большого ускорителя ИЗАБЕЛЛА, как только это стало соответствовать изменению физических целей. Но никаких изменений в мотивах постройки ССК не произошло. Прекращая сейчас программу ССК, после всей проделанной работы только потому, что в этом году напряженный бюджет, Соединенные Штаты, похоже, навсегда прощаются с любой надеждой иметь когда-нибудь солидную программу исследований в области физики элементарных частиц.

Возвращаясь мыслями к летней битве, я утешаю себя тем, что некоторые члены конгресса независимо от любых экономических или политических мотивов, заставивших их поддержать ССК, по-настоящему заинтересовались той наукой, ради которой проект осуществляется. Один из них — сенатор Беннет Джонстон из Луизианы, который

217

организовал группу поддержки проекта ССК во время дебатов в сенате. Его родной штат был экономически существенно заинтересован в строительстве магнитов для ССК, но помимо этого Джонстон оказался большим почитателем науки, что продемонстрировала его яркая речь на слушаниях в сенате. То же самое интеллектуальное восхищение наукой можно было обнаружить в заявлениях других членов конгресса: сенаторов Мойнихена из Нью-Йорка и Керри из Небраски, конгрессменов Надлера из Манхэттена и Гепхардта из Миссури, а также научного консультанта президента Джека Гиббонса. В мае 1993 г. я был членом группы физиков, которая встречалась с вновь избранными членами конгресса. После того, как другие поговорили о ценном технологическом опыте, который будет получен при строительстве ССК, я заметил, что хотя не очень разбираюсь в политике, не следует забывать, что есть немало избирателей, искренне интересующихся фундаментальными научными проблемами, а не только любыми технологическими приложениями. Конгрессмен из Калифорнии заметил после этого, что он согласен со мной только в одном пункте — в том, что я не разбираюсь в политике. Чуть позже в комнату вошел сенатор из Мэриленда, и, немного послушав дискуссию о побочных технологических результатах, заметил, что не следует забывать, что многие избиратели, кроме всего прочего, интересуются фундаментальными проблемами науки. Я ушел счастливым.

Дебаты о Суперколлайдере приводят и к более серьезным размышлениям. В течение столетий взаимоотношения науки и общества управлялись молчаливым соглашением. Ученые обычно хотели делать открытия, которые были бы универсальными, красивыми или фундаментальными, независимо от того, можно ли было предвидеть от них какой-либо конкретный выигрыш для общества. Некоторые люди, сами не являющиеся учеными, считают такую чистую науку очень увлекательной, но общество, в лице конгрессмена из Калифорнии, обычно желает поддерживать исследования в области чистой науки, главным образом, в ожидании новых приложений. Обычно такие ожидания оправдывались. Это не означает, конечно, что *любая* работа в науке обязательно приведет к чему-нибудь полезному. Речь идет о том, что, раздвигая границы знания, мы надеемся обнаружить действительно новые явления, которые могут оказаться полезными, как это случилось в свое время с радиоволнами, электронами и радиоактивностью. При попытках совершить эти открытия мы вынуждены проявлять технологическую и интеллектуальную виртуозность, приводящую к новым приложениям.

Но сейчас этой сделке, похоже, приходит конец. Не только некоторые члены конгресса потеряли доверие к чистой науке. Борьба за финансирование привела некоторых ученых, работающих в более прикладных областях, к отказу в поддержке тех из нас, кто занимается поиском законов природы. Те проблемы, с которыми столкнулся

218

проект ССК в конгрессе, есть лишь один симптом этого разочарования в чистой науке. Другим является недавняя попытка сената потребовать, чтобы национальный научный фонд выделил 60 % своих расходов на социальные нужды. Я не утверждаю, что деньги будут потрачены плохо, но ужасает то, что некоторые сенаторы выбрали исследования в чистой науке как то место, откуда эти деньги можно забрать. Споры об ССК подняли вопросы, значение которых далеко выходит за рамки этого проекта, и которые останутся с нами в грядущие десятилетия.

Остин, Техас Октябрь 1993 г.

Примечания

¹ Я всегда полагал, что согласно учению Аристотеля брошенный камень будет лететь по прямой, пока не истощится его начальный импульс, а затем упадет вертикально вниз. Однако мне не удалось обнаружить это утверждение в его сочинениях. Специалист по Аристотелю Роберт Ханкинсон из Техасского университета заверил меня, что на самом деле Аристотель никогда не утверждал ничего столь противоречащего наблюдениям, и что это есть позднейшее средневековое искажение взглядов Аристотеля.

² *Zisel E.* The Genesis of the Concept of Physical Law // *Philosophical Review*. 51 (1942): 245.

³ *Green P. S.* Alexander to Actium: The Historical Evolution of the Hellenistic Age (Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1990), pp. 456, 475-78.

⁴ Я благодарен Б. Нагелю за предложение использовать эту цитату.

⁵ См. *The Autobiography of Robert A. Millikan* (New York: Prentice-Hall, 1950), p. 23, а также заметку К. К. Darrow (*Isis* 41 (1950): 201).

⁶ Речь идет о физике Абдусе Саламе.

⁷ Основания для чувства удовлетворенности в науке конца XIX в. можно найти в книге: *Badash L.* The Completeness of Nineteenth-Century Science // *Isis* 63 (1972): 48-58.

⁸ *Michelson A. A.* Light Waves and Their Uses (Chicago: University of Chicago Press, 1903), p. 163.

⁹ *Dirac P. A. M.* Quantum Mechanics of Many Electron Systems // *Proceedings of the Royal Society A* 123 (1929): 713.

¹⁰ Цит. по *Boxer S.* // *New York Times Book Review*, January 26, 1992, p. 3.

¹¹ *Huxley T. H.* On a Piece of Chalk / Ed. Loren Eiseley (New York: Scribner, 1967).

¹² Конкретные цвета меняются от одного соединения меди к другому, поскольку окружающие атомы влияют на энергии атомных состояний.

¹³ *Gross D.J.* The Status and Future Prospects of String Theory // *Nuclear Physics B (Proceedings Supplement)* 15 (1990): 43.

¹⁴ *Nagel E.* The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation (New York: Harcourt, Brace, 1961).

¹⁵ Согласно законам Кеплера, орбиты планет имеют форму эллипсов, в одном из фокусов которых находится Солнце; при обращении вокруг Солнца скорость каждой планеты меняется так, что линия, соединяющая планету с Солнцем, заметает за равные промежутки времени равные площади; квадраты периодов обращения пропорциональны кубам больших полуосей эллиптических орбит. Законы Ньютона утверждают, что каждая частица во Вселенной притягивает любую другую частицу с силой, пропорциональной произведению масс частиц, и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, а также определяют, как движутся любые тела под действием любой заданной силы.

¹⁶ *Shaefer H. F. III.* Methylene: A Paradigm for Computational Quantum Chemistry // *Science* 231 (1986): 1100.

¹⁷ Ряд теоретиков исследуют возможность проведения вычислений включающих сильные ядерные взаимодействия, представляя пространство-время в виде решетки отдельных точек и используя действующие параллельно компьютеры для определения изменения значений полей в каждой точке. Выражается определенная надежда, что такими методами можно вывести свойства ядер из принципов квантовой хромодинамики. До сих пор не удалось даже вычислить массы протона и нейтрона, из которых состоят ядра.

¹⁸ Эта цитата взята из «Логико-философского трактата» Л. Витгенштейна ¹⁾. Во многом в том же духе мой философски настроенный друг проф. Филип Боббитт с факультета юриспруденции Техасского университета говорил мне: «Когда я отвечаю ребенку, спросившему меня, почему яблоко падает на Землю, что „это из-за тяготения, дорогой“, я не объясняю ничего. Предлагаемые физикой математические описания физического мира не являются объяснениями...». Я согласен с этим утверждением, если все, что подразумевается под тяготением, сводится к тому, что у тяжелых предметов имеется тенденция падать на Землю. С другой стороны, если понимать под тяготением весь комплекс явлений, описанных теориями Ньютона или Эйнштейна, включая движения приливов на Земле, планет и галактик, тогда ответ, что яблоко падает из-за тяготения, безусловно выглядит для меня как объяснение. Во всяком случае, именно так используют слово «объяснение» действующие ученые.

¹⁹ Наиболее стабильными являются те элементы, у которых число электронов полностью заполняет одну или несколько оболочек. К таким элементам относятся благородные газы гелий (два электрона), неон (десять электронов), аргон (восемнадцать электронов) и т.д. (Эти газы называются благородными, так как вследствие стабильности их атомов эти газы не участвуют в химических реакциях.) У кальция двадцать электронов, так что два из них находятся вне заполненных оболочек аргона, и они могут быть легко потеряны. Кислород имеет восемь электронов, так что не хватает как раз двух для того, чтобы заполнить оболочки неона, так что кислород охотно подбирает два электрона, чтобы заполнить дырки в своих оболочках. Углерод имеет шесть электронов, так что его можно рассматривать либо как гелий с четырьмя лишними электронами, либо как неон с четырьмя недостающими электронами, и поэтому углерод может как терять, так и приобретать четыре электрона. (Такая амбивалентность позволяет атомам углерода очень сильно связываться друг с другом, например, как в алмазе.)

²⁰ Если атом обладает положительным или отрицательным электрическим зарядом, то он стремится захватывать или терять электроны до тех пор, пока не станет нейтральным.

²¹ *Anderson P.* // *Science* 177 (1972): 393.

²² Чтобы определить энтропию, представьте, что температура некоторой системы очень медленно увеличивается от абсолютного нуля. Увеличение энтропии системы при получении каждой последующей

маленькой

¹⁾ *Витгенштейн Л.* Логико-философский трактат. М.: Иностранная литература, 1958.

221

порции тепловой энергии равно этой энергии, деленной на ту абсолютную температуру, при которой тепловая энергия передается.

²³ Важно заметить, что в системе, обменивающейся энергией с окружающей средой, энтропия может уменьшаться. Возникновение жизни на Земле связано с уменьшением энтропии, и это разрешено термодинамикой, поскольку Земля получает энергию от Солнца и отдает энергию в окружающее пространство.

²⁴ *Nagel E.* The Structure of Science, pp. 338—45.

²⁵ История этой битвы излагается в книге: *Brush S.* The Kind of Motion We Call Heat (Amsterdam: North-Holland, 1976), особенно в разделе 1.9 книги 1.

²⁶ Термодинамика применима к черным дырам не потому, что внутри них находится большое число атомов, а потому, что черные дыры содержат большое число определяемых квантовой теорией гравитации фундаментальных единиц массы, каждая из которых равна 10^{-5} г и называется массой Планка. Если бы черная дыра имела массу меньше 10^{-5} г, термодинамика к ней была бы неприменима.

²⁷ *Hoffman R.* Under the Surface of the Chemical Article // *Angewandte Chemie*

27 (1988): 1597-1602.

²⁸ *Primas H.* Chemistry, Quantum Mechanics, and Reductionism, 2nd ed. (Berlin: Springer-Verlag, 1983).

²⁹ *Pauling L.* Quantum Theory and Chemistry // *Max Plank Festschrift* / Ed. B. Kockel, W. Mocke, and A. Papapetrou (Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, 1959), pp. 385-88.

³⁰ *Pippard A. B.* The Invincible Ignorance of Science // *Contemporary Physics* 29 (1988): 393 — лекция памяти Эддингтона, прочитанная в Кэмбридже

28 января 1988.

³¹ Иногда утверждают, что разница между человеком и другими животными состоит в способности говорить и что люди обретают сознание только тогда, когда начинают говорить. В то же время компьютеры используют определенный язык, но не кажутся обладающими сознанием, а наш старый сиамский кот Тай Тай никогда не говорил (и имеет ограниченное число выражений мордочки), но во всех остальных отношениях проявляет те же признаки сознательной деятельности, что и люди.

³² *Ryle G.* The Concept of Mind (London: Hutchinson, 1949).

³³ *Gissing G.* The Place of Realism in Fiction. Reprinted in *Selections Autobiographical and Imaginative from the Works of George Gissing* (London: Jonathan Cape and Harrison Smith, 1929), p. 217.

³⁴ *Moyers B.* A World of Ideas / Ed. B. S. Flowers (New York: Doubleday, 1989), pp. 249-62.

³⁵ *Anderson P.* On the Nature of Physical Law // *Physics Today*, December 1990, p. 9.

³⁶ Откровенно говоря, я должен добавить, что Ян рассматривает свою работу как разумное расширение копенгагенской интерпретации квантовой механики, а не как часть паранормальной программы. Реалистичная интерпретация квантовой механики на языке «многих историй» имеет то преимущество, что позволяет избежать такого рода путаницы.

³⁷ *Jahn R. G.* // *Physics Today*, October 1991, p. 13.

222

³⁸ Общая теория относительности во многом основана на том принципе, что гравитационные поля *не оказывают* влияния на очень маленькие свободно падающие тела, кроме того, что определяют их свободное падение. Земля находится в состоянии свободного падения в Солнечной системе, поэтому, находясь на Земле, мы не ощущаем гравитационного поля Луны, Солнца или чего-нибудь еще, не считая явлений вроде приливов, возникающих из-за того, что Земля не очень мала.

³⁹ *Science*, August 9, 1991, p. 611.

⁴⁰ Однажды в статье я назвал эту точку зрения «объективный редукционизм», см. *Weinberg S.* Newtonianism, Reductionism, and the Art of Congressional Testimony // *Nature* 330 (1987): 433-37. Я сомневался, что эта фраза будет подхвачена философами науки, но ее подхватил, по крайней мере, биохимик Дж. Робинсон (См. *Robinson J. D.* Aims and Achievements of the Reductionist Approach in Biochemistry/Molecular Biology/Cell Biology: A Response to Kincaid // *Philosophy of Science*).

⁴¹ *Достоевский Ф. М.* Записки из подполья: Собр. соч. в 9 т. Т. 2. М.: АСТ, 2003..

⁴² *Mayr E.* How Biology Differs from the Physical Sciences // *Evolution at a Crossroads* / Ed. D. Depew and B. Weber (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1985), p. 44.

⁴³ *Weinberg S.* Unified Theories of Elementary Particle Interactions // *Scientific American* 231 (July 1974): 50.

⁴⁴ *Weinberg S.* Newtonianism.

⁴⁵ См. *Mayr E.* The Limits of Reductionism и мой ответ в журнале *Nature* 331 (1987): 475.

⁴⁶ *Park R. L.* // *The Scientist*, June 15, 1987 (из доклада на симпозиуме "Большая наука/Малая наука" на ежегодном заседании Американского физического общества 20 мая 1987).

⁴⁷ Цит. по *Anderson R W* Письмо в газету Нью-Йорк Таймс от 8 июня 1986.

⁴⁸ *Rubin H.* Molecular Biology Running into a Cul-de-sac? Письмо в журнал *Nature* 335 (1988): 121.

⁴⁹ *Mayr E.* The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1982), p. 62.

⁵⁰ Я использую здесь слово «прямая», так как на самом деле разные ветви физики оказывают друг другу значительную косвенную помощь. Частично это проявляется в виде взаимного обогащения идеями. Так, физики-твердотельщики добыли один из своих главных математических методов (так называемый метод

ренормализационной группы) в физике частиц, а физики-частичники узнали о явлении спонтанного нарушения симметрии из физики твердого тела. В 1987 г. на слушаниях в комитете конгресса, давая показания в поддержку проекта ССК, Роберт Шриффер (один из создателей, вместе с Джоном Бардиным и Леоном Купером, современной теории сверхпроводимости) подчеркнул, что его собственная работа над проблемой сверхпроводимости возникла из опыта работы над мезонными теориями в физике элементарных частиц. (В статье «Джон Бардин и теория сверхпроводимости», опубликованной в журнале *Physics Today* в апреле 1992 г., Шриффер отмечает, что высказанная им в 1957 г. догадка о виде квантово-механической волновой функции возникла из размышлений о более чем двадцатилетней давности работе Синитиро Томонаги

223

по теории поля.) Конечно, есть и другие способы взаимопомощи разных ветвей физики. Например, если бы не удалось создать магниты со сверхпроводящими обмотками, то энергетические затраты на работу ССК сделали бы проект безнадежно дорогим; синхротронное излучение, испускаемое в качестве побочного продукта в ряде ускорителей высоких энергий, оказалось весьма ценным в медицине и материаловедении.

⁵¹ Weinberg A. M. Criteria for Scientific Choice // *Physics Today* March 1964, pp. 42-48. Также см. Weinberg A. M. Criteria for Scientific Choice // *Minerva* 1 (winter 1963): 159-71; и Criteria for Scientific Choice II: The Two Cultures // *Minerva* 3 (Autumn 1964): 3-14.

⁵² Weinberg S. Newtonianism.

⁵³ Cleick J. Chaos: Making a New Science (New York: Viking, 1987).

⁵⁴ Выступление Дж. Глейка на Нобелевской конференции в колледже Густава Адольфа в октябре 1991.

⁵⁵ Конечно, в любом объеме пространства имеется бесконечное количество точек, и реально невозможно привести список чисел, представляющий любую волну. Однако для наглядности (а часто и для численных расчетов) можно представлять себе пространство состоящим из очень большого, но конечного числа точек, занимающих большой, но конечный объем.

⁵⁶ Они представляют собой комплексные числа, в том смысле, что в них содержится величина, обозначаемая буквой *i* и равная корню квадратному из -1, а также обычные положительные и отрицательные числа. Та часть комплексного числа, которая пропорциональна *g*, называется его мнимой частью, оставшаяся называется действительной частью. Я опускаю подробности, связанные с этим усложнением, так как хотя оно само по себе важно, но не влияет на те замечания по поводу квантовой механики, которые я хотел бы сделать.

⁵⁷ На самом деле волновой пакет электрона начинает рассыпаться даже до того, как электрон ударяется об атом. В конце концов это стало понятным благодаря тому, что в соответствии с вероятностной интерпретацией квантовой механики волновой пакет описывает электрон не с одной определенной скоростью, а с целым набором разных возможных скоростей.

⁵⁸ Это описание может привести к ошибочному заключению, что в состоянии с определенным импульсом существует чередование точек, в которых нахождение электрона маловероятно (соответствующие значения волновой функции наименьшие), и точек, в которых электрон может находиться с большой вероятностью (соответствующие значения волновой функции максимально возможные). Это неправильно и объясняется отмеченным в предыдущем примечании фактом, что волновая функция комплексна. На самом деле у каждого значения волновой функции есть две части — действительная и мнимая и их фазы не совпадают: когда одна мала, другая велика. Вероятность того, что электрон находится в любом конкретном малом объеме, пропорциональна сумме квадратов двух частей волновой функции в данной точке пространства, и в состоянии с определенным импульсом эта сумма строго постоянна.

⁵⁹ Bohr N. Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, Como, Settembre 1927. Перепечатано в журнале *Nature* 121 (1928): 78, 580.

224

⁶⁰ Строго говоря, вероятности различных конфигураций определяются суммой квадратов действительной и мнимой частей значений волновой функции.

⁶¹ В реальном мире частицы, естественно, не ограничены только двумя положениями, однако существуют физические системы, которые для практических целей можно рассматривать как имеющие только две конфигурации. Реальный пример такой системы с двумя состояниями — спин электрона. (Спин или момент импульса любой системы есть мера того, насколько быстро она вращается, насколько она массивна и насколько далеко от оси вращения находится масса. Принимается, что спин направлен вдоль оси вращения.) В классической механике спин гироскопа или планеты может иметь любые величины и направление. Напротив, в квантовой механике при измерении величины спина электрона относительно любого направления, например на север (обычно с помощью измерения энергии взаимодействия спина с магнитным полем в данном направлении), мы можем получить только один из двух результатов: электрон вращается вокруг этого направления либо по часовой стрелке, либо против нее, но величина спина всегда одна и та же и равна постоянной Планка, деленной на 4 π .

⁶² Сумма этих двух вероятностей должна равняться единице (т.е. 100%), так что сумма квадратов значений *здесь* и *там* должна равняться единице. Отсюда вытекает очень полезная геометрическая картина. Нарисуем прямоугольный треугольник, горизонтальная сторона которого имеет длину, равную величине *здесь* волновой функции, а вертикальная сторона — длину, равную величине *там*. (Конечно, под горизонтальным и вертикальным направлениями я подразумеваю любые два взаимно перпендикулярных направления. С тем же успехом можно говорить о направлениях вдоль и поперек.) Не обязательно нужно быть генералом современной армии, чтобы знать один забавный факт о квадрате гипотенузы этого треугольника: она равна сумме квадратов вертикальной и горизонтальной сторон. Но, как мы только что заметили, эта сумма равна единице, поэтому длина гипотенузы тоже равна единице. (Под единицей я подразумеваю не 1 метр или 1 фут, а число 1, так как вероятности не измеряются в квадратных метрах или квадратных футах.) Обратно, если нам дана стрелка

единичной длины, имеющая определенное направление в двумерном пространстве (иными словами, двумерный единичный вектор), то ее проекции на горизонтальное и вертикальное направления или на любую другую пару взаимно перпендикулярных направлений задает пару чисел, квадраты которых в сумме равны единице. Таким образом, вместо того, чтобы задавать значения *здесь* и *там*, можно представлять состояние стрелкой (гипотенузой нашего треугольника) единичной длины, проекция которой на любое направление представляет значение волновой функции для той конфигурации системы, которая соответствует этому направлению. Такая стрелка называется *вектором состояния*. Дирак развил довольно абстрактную формулировку квантовой механики на языке векторов состояний, преимущества которой перед формулировкой на языке волновых функций заключаются в том, что можно говорить о векторах состояний без ссылок на конкретные конфигурации системы.

⁶³ Конечно, большинство динамических систем более сложны, чем наша мифическая частица. Например, рассмотрим две такие частицы. Тогда

возможны четыре конфигурации, в которых частицы 1 и 2 находятся в состояниях: *здесь* и *здесь*, *здесь* и *там*, *там* и *здесь*, *там* и *там*. Таким образом, волновая функция состояния двух частиц принимает четыре значения, и для описания эволюции этого состояния во времени требуется задать шестнадцать постоянных чисел. Заметим, что имеется ровно одна волновая функция, описывающая объединенное состояние двух частиц. Это же верно и в общем случае: нам не нужно иметь отдельные волновые функции для каждого электрона или другой частицы, а лишь одну общую волновую функцию системы, сколько бы частиц она не содержала.

⁶⁴ Утверждая, что эти состояния имеют определенный импульс, я говорю неточно. При двух возможных положениях состояние *иди* максимально близко к состоянию ровной волны с горбом *здесь* и впадиной *там*, отвечающей частице с ненулевым импульсом, а состояние *стой* похоже на плоскую волну, длина волны которой много больше, чем расстояние между *здесь* и *там*, и соответствует состоянию покоя частицы. Это примитивная версия того, что математики называют фурье-анализом. (Строго говоря, мы должны записать значения *стой* и *иди* волновой функции как сумму или разность значений *здесь* или *там*, деленных на корень из двух, для того, чтобы удовлетворить упомянутому в предыдущем примечании условию, что сумма квадратов двух значений должна равняться единице.)

⁶⁵ *Capra F.* The Tao of Physics (Boston: Shambhala, 1991).

⁶⁶ Физики иногда используют термин «квантовый хаос», имея в виду квантовые системы, которые *были бы* хаотическими в классической физике. Однако сами квантовые системы никогда не могут быть хаотическими.

⁶⁷ В значительной степени это сделал А. Аспект.

⁶⁸ Явление, при котором две мировые истории прекращают интерферировать друг с другом, называется «декогерентностью». Изучение вопроса о том, как это происходит, привлекло позднее внимание теоретиков, в том числе Мюррея Гелл-Манна и Джеймса Хартля и независимо Брайса Де Витта.

⁶⁹ Вот неполный перечень ссылок: *Hartle J. B.* Quantum Mechanics of Individual Systems // American Journal of Physics (1968): 704; *Witt B. S. De and Graham N.* // The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics (Princeton: Princeton University Press, 1973), pp. 183—86; *Deutsch D.* Probability in Physics. Oxford University Mathematical Institute preprint, 1989; *Aharonov Y.*

⁷⁰ Позднее Польчински нашел слегка модифицированную интерпретацию этой теории, в которой подобная связь со сверхсветовой скоростью запрещена, но «разные миры», соответствующие разным результатам измерений, могут продолжать взаимодействовать друг с другом.

⁷¹ Иными словами, орбиты не являются точно замкнутыми. Планета, совершающая движение из начальной точки максимального сближения с Солнцем (перигелия) к точке, находящейся на максимальном расстоянии от Солнца, и назад в точку перигелия, совершает оборот вокруг Солнца на величину чуть больше 360°. Результирующее медленное изменение ориентации орбиты обычно называют прецессией перигелия.

⁷² Информация, приведенная здесь о докладах Нобелевских лауреатов и номинациях, взята из прекрасной научной биографии Эйнштейна (*Pais A.*

²²⁶ Subtle Is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein (New York: Oxford University Press, 1982), chap. 30). (Рус. пер. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, Физматлит, 1989.)

⁷³ Для дальнейших ссылок по теме см. *Mayo D. G.* Novel Evidence and Severe Tests // Philosophy of Science 58 (1991): 523.

⁷⁴ Я сделал эту заметку в моей лекции в Колумбийском университете в 1984 г. И я был очень рад увидеть, что тот же самый вывод был получен независимо историком науки; см. *Brush S.* Prediction and Theory Evaluation: The Case of Light Bending // Science 246 (1991): 1124.

⁷⁵ Должен заметить, что Эйнштейн предложил третий тест общей теории относительности, основанный на предсказываемом гравитационном красном смещении света. Брошенный с поверхности Земли вверх камень теряет свою скорость, преодолевая силу земного притяжения. Точно так же свет, испущенный с поверхности звезды или планеты, теряет энергию, улетая в открытый космос. Эта потеря энергии светом проявляется как рост длины волны и, следовательно (для видимого света), как сдвиг в красную сторону спектра. Общая теория относительности предсказывает, что относительный сдвиг для света, испущенного с поверхности Солнца, составляет $2,12 \cdot 10^{-6}$. Было высказано предложение изучить спектр света от Солнца и посмотреть, не сдвинуты ли спектральные линии на указанную величину относительно своих нормальных положений. Астрономы стали искать эффект, но поначалу ничего не обнаружили. Некоторых физиков это обеспокоило. В докладе Нобелевского комитета за 1917 г. отмечалось, что измерения К. Сентджона в обсерватории Маунт-Вильсон не обнаружили красного смещения, и делался вывод, что «эйнштейновская теория относительности не заслуживает Нобелевской премии, каковы бы ни были ее достоинства в других отношениях». В 1919 г. Нобелевский комитет опять отметил красное смещение как причину, по которой вопрос об общей теории

относительности откладывается. Однако большинство физиков того времени (включая самого Эйнштейна), похоже, не были слишком обеспокоены проблемой красного смещения. Сейчас мы видим, что техника, использовавшаяся в 20-е гг., не позволяла провести аккуратное измерение гравитационного красного смещения света от Солнца. Так, предсказываемое гравитационное красное смещение $2 \cdot 10^{-6}$ могло быть замаскировано смещением, возникающим от излучающих свет конвективных потоков газов на поверхности Солнца (знакомый эффект Доплера) и не имеющим никакого отношения к общей теории относительности. Если эти газы испускаются в сторону наблюдателя со скоростью 600 м/с (что вполне возможно на Солнце), эффект полностью перекроет гравитационное красное смещение. Только в последнее время тщательное изучение света, исходящего от края солнечного диска (где конвективные потоки испускаются в основном под прямым углом к лучу зрения), привело к обнаружению гравитационного красного смещения примерно предсказываемой величины. На самом деле первые точные измерения гравитационного красного смещения использовали не свет от Солнца, а гамма-лучи (свет очень коротких длин волн), которые поднимались вверх или падали с высоты 22,6 м в башне Джефферсоновской физической лаборатории в Гарварде. Эксперимент Р. Паунда и Г. Ребки в 1960 г. обнаружил изменение длины волны гамма-лучей, ко-

227

торое с точностью 10 % согласовывалось с предсказаниями общей теории относительности. Через несколько лет точность была доведена до 1 %.

⁷⁶ Особенно в работе Ирвина Шапиро из МТИ.

⁷⁷ Это явление известно как броуновское движение. Оно вызвано соударениями молекул жидкости с частицами. С помощью эйнштейновской теории броуновского движения можно использовать наблюдения этого движения для вычисления ряда свойств молекул. Кроме того, это явление помогло физикам и химикам убедиться в реальности молекул.

⁷⁸ Для знатоков замечу, что здесь речь идет о безмассовой скалярной теории.

⁷⁹ Например, предположим, что мы выбрали систему отсчета, которая во всем пространстве движется с ускорением 9,8 м/с² в направлении от Техаса к центру Земли. В этой системе отсчета мы в Техасе не будем ощущать гравитационного поля, поскольку это та система отсчета, которая свободно падает в Техасе. Однако наши друзья в Австралии почувствуют двойную перегрузку по сравнению с обычным гравитационным полем, так как в Австралии такая система отсчета будет ускоряться от центра Земли, а не к центру.

⁸⁰ Это верно в отношении ньютоновской формулировки его теории, основанной на действии сил на расстоянии, но не в отношении последующей переформулировки теории Ньютона (сделанной Лапласом и др.) на языке теории поля. Но даже в теоретико-полевой версии теории Ньютона нетрудно добавить новое слагаемое в полевые уравнения, которые приведут к другим изменениям в зависимости силы от расстояния. В частности, закон обратных квадратов может быть заменен формулой, в которой вплоть до определенных расстояний сила тяготения приближенно меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, но на больших расстояниях экспоненциально быстро убывает. В общей теории относительности модификации подобного рода невозможны.

⁸¹ Борн, Гейзенберг и Йордан на самом деле рассматривали только упрощенную версию электромагнитного поля, в которой игнорировались осложнения, связанные с поляризацией света. Эти осложнения были несколько позднее рассмотрены Дираком, а полное рассмотрение квантово-полевой теории электромагнетизма было сделано Энрико Ферми.

⁸² Разрешенные энергии фотонов образуют континуум, так что эта «сумма» является на самом деле интегралом.

⁸³ История этих открытий рассказывается в книге *Cao T. Y., Schweber S. S. The Conceptual Foundations and Philosophical Aspects of Renormalization Theory*. Опубликовано в Synthese (1992).

⁸⁴ Строго говоря, Лэмб измерил разность сдвигов энергий двух состояний атома водорода, которые, согласно старой теории Дирака, должны были в отсутствие процессов испускания и обратного поглощения фотонов иметь строго одинаковые энергии. Хотя Лэмб и не мог измерить точные энергии этих двух атомных состояний, он смог установить, что эти энергии различаются на крохотную величину, показав тем самым, что по какой-то причине энергии двух состояний сдвинулись на разные величины. Эта идея была высказана несколько ранее Дираком, Вайскопфом и Крамерсом.

228

⁸⁶ Эти вычисления были проведены самим Лэмбом вместе с Кроллом, а также Вайскопфом и Френчем.

⁸⁷ Цитата взята из работы "Aus dem Nachlass der Achtzigerjahre" опубликованной в F. Nietzsche, Werke III / Ed. Schleier, 6th ed. (Munich: Carl Hauser, 1969), p. 603. Эта фраза — сюжет романа «Смерть пчеловода» (Death of a Beekeeper. New York: New Directions, 1981) моего тexasкого коллеги Ларса Густавсона.

⁸⁸ Эти теоретические и экспериментальные результаты были опубликованы в работе *Kinoshita T. // Quantum Electrodynamics* / Ed. T. Kinoshita (Singapore: World Scientific, 1990).

⁸⁹ В квантовой электродинамике существуют и более серьезные проблемы. В 1954 г. Мюррей Гелл-Манн и Френсис Лоу показали, что эффективный заряд электрона очень медленно возрастает с ростом энергии процесса, в котором заряд измеряется, и выдвинули гипотезу (ранее высказанную советским физиком Львом Ландау), что при некоторой очень большой энергии эффективный заряд становится бесконечным. Позднейшие вычисления показали, что эта катастрофа происходит только в рамках чистой квантовой электродинамики — теории фотонов и электронов, и нигде более. Однако та энергия, при которой возникает бесконечность, столь велика (много больше, чем вся энергия, содержащаяся в полной массе наблюдаемой Вселенной), что задолго до того, как она будет достигнута, станет невозможно игнорировать все другие сорта частиц в природе. Таким образом, даже если и есть какие-то вопросы о математической согласованности квантовой электродинамики, они сливаются с вопросом о согласованности наших квантовых теорий всех частиц и взаимодействий.

⁹⁰ Это сделали Фейнман и Гелл-Манн, и независимо Маршак и Сударшан.

⁹¹ Здесь я ссылаюсь на обобщение квантовой электродинамики, сделанное Янгом и Миллсом.

⁹² Это не совсем точно, поскольку я упомянул эту работу в докладе на Сольвеевском конгрессе в Брюсселе в 1967 г. Однако Институт научной информации подсчитывает только статьи, опубликованные в журналах, а мое замечание было опубликовано в материалах конференции.

⁹³ Более точно, это была единственная статья по физике элементарных частиц (и вообще по физике, не считая биофизики, химической физики и кристаллографии) в списке из 100 статей по всем наукам, которые чаще всего цитировались в охваченный исследованиями Института научной информации период с 1945 по 1988 гг. (Из-за войны с 1938 по 1945 г., вероятно, просто не было часто цитируемых работ по физике элементарных частиц.)

⁹⁴ Несколько лет тому назад я побывал в Оксфорде и имел возможность спросить руководителя оксфордского эксперимента с висмутом Пэта Сандерса, выясняла ли его группа, что было не так в предыдущих опытах. Он ответил мне, что этим никто не занимался и, к сожалению, не мог заниматься, поскольку оксфордские экспериментаторы уничтожили аппаратуру и использовали ее как часть новой установки, на которой теперь получают правильные ответы. Вот так это делается.

⁹⁵ Это предложение основывалось на принципе симметрии, предложенном Роберто Печчеи и Элен Квинн.

229 ⁹⁶ Эти модификации предложили М. Дайн, В. Фишлер и М. Среднички, а также Дж. Ким.

⁹⁷ Это излучение обнаружили А. Пензиас и Р. Вильсон. Об открытии фонового излучения я рассказываю в своей книге «Первые три минуты». Например, Бэзил Лиддел Гарт — защитник «непрямых действий».

⁹⁹ Должен признать, что когда выражение «искусство войны» появляется в переводах классических трудов Сун Цзы, Жомини и Клаузевица, слово «искусство» используется в противоположность слову «наука», в том же смысле, как «умение» противоположно «знанию», но не как «субъект» противоположен «объекту» или «вдохновение» — «порядку». Использование этими авторами слова «искусство» служит для того, чтобы подчеркнуть, что они пишут об умении воевать, поскольку хотят принести пользу людям, реально выигрывающим войны, но собираются подойти к вопросу научно и систематически. Генерал конфедератов Джеймс Лонгстрит использовал термин «искусство войны» в очень похожем на тот, который использую я, смысле, когда говорил, что и Макклеллан, и Ли были «мастерами знания войны, но не ее искусства». Позднейшие историки, вроде Чарльза Омана и Сирила Фоллса, писавшие об «искусстве войны», объяснили, что не существует системы войны. Читатель, который добрался до этого места книги, согласится, что это же верно в отношении системы науки.

¹⁰⁰ Астрофизик С. Чандрасекар трогательно написал о роли красоты в науке (Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations // Science (Chicago: University of Chicago Press, 1987) и Bulletin of the American Academy of Arts and Science 43, no.3 (December 1989): 14). Я имею в виду десять уравнений поля и четыре уравнения движения.

¹⁰² Цитата взята из *Holton G. Constructing a Theory: Einstein's Model* // American Scholar 48 (summer 1979): 323.

¹⁰³ Гравитоны экспериментально не обнаружены, но это неудивительно. Расчеты показывают, что они так слабо взаимодействуют, что отдельные гравитоны и не могли быть обнаружены ни в одном из до сих пор осуществленных экспериментов. Тем не менее никто серьезно не сомневается в существовании гравитонов.

Строго говоря, эти семейства образуют только левые состояния электрона и нейтрино и *u*- и *d*-кварков. (Имеется в виду, что если совместить большой палец левой руки с осью вращения, направленной вдоль скорости частицы, то пальцы левой руки, охватывая ось, укажут направление вращения.) Различие между семействами, образованными левыми и правыми частицами, является причиной нарушения слабыми ядерными силами симметрии между правым и левым. (Асимметрия правого и левого в слабых взаимодействиях была предсказана в 1956 г. теоретиками Т. Ли и Ч. Янгом. Она была подтверждена в опытах по ядерному бета-распаду группой из Национального бюро стандартов в Вашингтоне под руководством Ц. Ву и в опытах по распаду пи-мезонов Р. Гарвиным, Л. Ледерманом и М. Вейнрихом, а также Дж. Фридманом и В. Телегди.) Мы до сих пор не знаем, почему только левые электроны, нейтрино и кварки образуют эти семейства; этот вопрос является вызовом для теорий, которые выйдут за рамки стандартной модели элементарных частиц.

230 В 1918 г. математик Герман Вейль предположил, что симметрия общей теории относительности по отношению к зависящим от пространства-времени изменениям положения или ориентации должна быть дополнена симметрией по отношению к зависящим от пространства-времени изменениям способа измерения (или «калибровки») расстояний и времени. Вскоре этот принцип симметрии был отвергнут физиками (хотя его версии до сих пор возникают в спекулятивных теориях), но математически он очень похож на внутреннюю симметрию уравнений электродинамики, которую стали поэтому называть калибровочной инвариантностью. Затем, после того как в 1954 г. Ч. Янг и Р. Миллс, в надежде понять сильные взаимодействия, ввели более сложный вид локальной внутренней симметрии, ее тоже называли калибровочной симметрией.

¹⁰⁶ Различные варианты введения нового атрибута кварков — цвета — были предложены О. Гринбергом, М. Ханом и Й. Намбу, и В. Бардиным, Г. Фрицшем и М. Гелл-Манном²⁾.

¹⁰⁷ См. примечания к главе VIII.

¹⁰⁸ В дираковской теории электроны вечны. Процесс рождения электрона и позитрона интерпретируется как переход электрона отрицательной энергии в состояние положительной энергии с появлением дырки в море электронов отрицательных энергий, которая наблюдается как позитрон. Аннигиляция электрона и позитрона интерпретируется как падение электрона в эту дырку. В ядерном бета-распаде электроны рождаются *без позитронов* за счет энергии и электрического заряда электронного поля.

¹⁰⁹ В начале 70-х гг. Дирак и я были на конференции во Флориде. Я воспользовался случаем и спросил его, как он может объяснить тот факт, что существуют частицы (вроде пи-мезона или *W*), которые имеют спин, отличный от спина электрона, и не могут иметь стабильных состояний отрицательной энергии, но тем не менее

имеют определенные античастицы. Дирак ответил, что он никогда не думал, что эти частицы существенны.

¹¹⁰ Из воспоминаний Гейзенберга. Цит. по работе *Telegdi V. and Weisskopf V. // Physics Today*, July 1991, p. 58. Такое же мнение по поводу ограниченности многообразия возможных математических форм было высказано математиком Э. Глисоном.

¹¹¹ Всю свою жизнь Харди гордился, что его исследования в чистой математике, возможно, не будут иметь никаких практических применений. Но когда Керзон Хуанг и я работали в МТИ над поведением вещества при экстремально высокой температуре, мы нашли необходимые нам формулы в работе Харди и Рамануджана по теории чисел.

¹¹² Другими главными строителями искривленного пространства были Янош Больяи и Николай Иванович Лобачевский. Работы Гаусса, Больяи и Лобачевского были важными для будущего развития математики, поскольку они описали такое пространство не просто как искривленное наподобие поверхности Земли и погруженное в неискривленное пространство более высокой размерности, а как обладающее внутренней кривизной, без каких-либо ссылок на то, как это пространство погружено в высшие измерения.

²⁾ Независимо и раньше понятие цвета было введено в работе Н. Н. Боголюбова, Б. В. Струминского и А. Н. Тавхелидзе. — *Прим. перев.*

231

¹¹³ Одна из версий пятого постулата Евклида утверждает, что через данную точку вне данной прямой можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной. В новой неевклидовой геометрии Гаусса, Больяи и Лобачевского можно провести много таких параллельных прямых.

¹¹⁴ Эти эксперименты были сделаны М.Туве вместе с Н. Хейденбергом и Л. Хафстадом с помощью ускорителя Ван де Граафа напряжением 1 млн В, который выстреливал пучок протонов на богатую протонами мишень типа парафина.

¹¹⁵ По этой причине такая симметрия называется *симметрией изотопического спина* ³⁾ (Она была предложена в 1936 г. Г. Брейтом и Ю. Финбергом и независимо Б. Кассеном и Ю. Кондоном на основании экспериментов Туве и др.) Симметрия изотопического спина математически аналогична внутренней симметрии, лежащей в основе слабых и электромагнитных взаимодействий в электрослабой теории, но физически эти симметрии различны. Одно отличие заключается в том, что в семейства группируются разные частицы: протон и нейтрон в случае симметрии изотопического спина и левые электрон и нейтрино, а также левые *и*- и *d*-кварки в случае электрослабой симметрии. Кроме того, электрослабая симметрия утверждает инвариантность законов природы относительно преобразований, которые могут зависеть от положения в пространстве и времени. В то же время уравнения, описывающие ядерную физику, сохраняют свой вид, только если мы преобразуем протоны и нейтроны друг в друга одинаково везде и во все моменты времени. Наконец, в рамках современной теории сильных ядерных взаимодействий симметрия изотопического спина является приближенной и воспринимается как случайное следствие малых масс кварков, а электрослабая симметрия точна и считается фундаментальным принципом электрослабой теории.

¹¹⁶ Если два преобразования по-отдельности оставляют что-то неизменным, то это же верно для их «произведения», определяемого как осуществление одного преобразования за другим. Если преобразование оставляет что-то неизменным, то это же верно для обратного преобразования, отменяющего действие первого. Кроме того, всегда существует одно преобразование, оставляющее все неизменным, т. е. преобразование, которое не делает ничего. Это преобразование называют единичным, так как оно действует как умножение на единицу. Если выполнены перечисленные три свойства, то любое множество операций становится группой.

¹¹⁷ Говоря коротко, существуют три бесконечные серии простых групп Ли: знакомые группы вращений в двух, трех и более измерениях и еще две серии преобразований, в чем-то похожих на вращения, которые называются унитарными и симплектическими преобразованиями. Кроме того, существует ровно пять «исключительных» групп Ли, не принадлежащих ни одной из перечисленных серий.

¹¹⁸ Открытие сделала группа ученых под руководством Н. Самиоса.

¹¹⁹ В работе Галуа идет речь о группе перестановок решений уравнения.

¹²⁰ См. *Wigner E. P. The Unreasonable Effectiveness of Mathematics // Communications in Pure and Applied Mathematics* 13 (1960): 1 — 14. (На русском

³⁾ Или *изотопической симметрией*. — *Прим. перев.*

232

языке опубликована в книге: *Вигнер Э. П. Инвариантность и законы сохранения. Этюды о симметрии*. М.: УРСС, 2002.)

¹²¹ *Richards J. L. Rigor and Clarity: Foundations of Mathematics in France and England, 1800-1840 // Science in Context* 4 (1991): 297.

¹²² *Crick F What Mad Pursuit: A Personal View of Scientific Discovery* (New York: Basic Books, 1988).

¹²³ Строго говоря, триплеты, не имеющие смысла, несут послание «конец цепочки».

¹²⁴ Из письма Кеплера к Фабрициусу (май 1605 года). Цит. по *Ziesel E. The Genesis of the Concept of Physical Law // Philosophical Review* 51 (1942): 245.

¹²⁵ Два моих друга-философа заметили, что название этой главы «Против философии» является преувеличением, так как я не *возражаю* против философии вообще, а только говорю о плохом влиянии на науку философских доктрин типа позитивизма и релятивизма. Они предположили, что я дал такой заголовок в качестве ответа на книгу Фейерабенда «Против метода». На самом деле заголовок этой статьи обязан своим происхождением заголовкам пары известных обзорных статей по юриспруденции: «Против распоряжения собственностью» Оуэна Фисса и «Против этикета» Луизы Вайнберг. В любом случае, я не думаю что название «Против позитивизма и релятивизма» было бы более привлекательно.

¹²⁶ *Gale G. Science and the Philosophers // Nature* 312 (1984): 491.

- ¹²⁷ *Wittgenstein L.* Culture and Value (Oxford: Blackwell, 1980).
- ¹²⁸ Например, см. некоторые статьи в *Reduction in Science: Structure, Examples, Philosophical Problems* / Ed. W. Balzer, D.A. Pearce, and H.-J. Schmidt, (Dordrecht: Reidel, 1984).
- ¹²⁹ Многие другие работающие ученые точно так же реагируют на писания философов. Например, в своем ответе философу Г. Кинсайду биохимик Дж. Робертсон заметил, что «биологи несомненно повинны в отвратительных философских грехах. И они должны с энтузиазмом приветствовать информированное внимание со стороны философов. Это внимание, однако, будет полезным, если философы разберутся в том, что биологи хотят и что они делают».
- ¹³⁰ *Feyerabend P. K.* Explanation, Reduction, and Empiricism // *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 3 (1962): 46—48. Философы, к которым обращается Фейерабенд, являются позитивистами Венского кружка, но о них речь пойдет позже.
- ¹³¹ *Hall Rupert A.* Making Sense of the Universe // *Nature* 327 (1987): 669.
- ¹³² Эта работа была построена на так называемой инфляционной космологии Алана Гута.
- ¹³³ Цит. по *Bernstein J.* Ernst Mach and the Quarks // *American Scholar* 53 (winter 1983-84): 12.
- ¹³⁴ Англ. перевод взят из *Sources of Quantum Mechanics* / Ed. B. L. van der Waerden (New York: Dover, 1967).
- ¹³⁵ Смотри книгу G. Gale «Science and the Philosophers».
- ¹³⁶ Среди историков науки идет спор о том, примирился ли Мах с философских позиций с специальной теорией относительности Эйнштейна, которая была навеяна собственными взглядами Маха.
- 233
- ¹³⁷ Мой друг Самбурский в очень молодом возрасте знал Кауфманна. Он подтвердил мое впечатление о Кауфманне как об очень жестком человеке, находящемся в плену собственной философии.
- ¹³⁸ Эта точка зрения была убедительно обоснована философом Д. Шэйпером в работе *Shapere D.* The Concept of Observation in Science and Philosophy // *Philosophy of Science* 49 (1982): 485-525.
- ¹³⁹ *Heisenberg W.* Encounters with Einstein, and other Essays on People, Places and Particles (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983), p. 114.
- ¹⁴⁰ *Bernstein J.* Ernst Mach.
- ¹⁴¹ Тем не менее я думаю, что мы извлекли полезные уроки из теории *S*-матрицы. Квантовая теория поля такова, какова она есть, потому что это единственный способ гарантировать, что наблюдаемые, и в частности *S*-матрица, будут иметь осозаемые физические свойства. В 1981 г. я делал доклад в Радиационной лаборатории в Беркли, и, поскольку я знал, что Джеффри Чу находится в зале, я проявил все свое старание, чтобы сказать побольше приятных вещей о положительном влиянии теории *S*-матрицы. После доклада Джефф подошел ко мне и сказал, что ему было приятно слушать мои замечания, но сейчас он работает над квантовой теорией поля.
- ¹⁴² Я имею в виду так называемые неабелевы калибровочные теории или теории Янга—Миллса.
- ¹⁴³ Это вычисление использует математические методы, разработанные в 1954 г. в связи с квантовой электродинамикой Мюрреем Гелл-Манном и Френсисом Лоу. Однако в квантовой электродинамике и в большинстве других теорий взаимодействие увеличивается с увеличением энергии.
- ¹⁴⁴ В частности, эксперименты по разрушению протонов и нейтронов электронами больших энергий, проведенные в Стэнфордском центре линейного ускорителя группой под руководством Джерома Фридмана, Генри Кендалла и Ричарда Тейлора.
- ¹⁴⁵ Речь идет о Гроссе, Вильчеке и обо мне.
- ¹⁴⁶ Насколько я знаю, эта идея принадлежит Г. 'т Хофту и Л. Сасскиндю. Более ранее предложение о пленении кварков было высказано Г. Фритчем, М. Гелл-Манном и Г. Лейтвилером.
- ¹⁴⁷ Аргументы в пользу существования кварков стали бесспорными после открытия в 1974 г. группами, возглавлявшимися Бартоном Рихтером и Сэмом Тингом, частицы, которую они назвали, соответственно, ψ и «7. Свойства этой частицы ясно показывали, что она состоит из нового тяжелого кварка и соответствующего антикварка, хотя эти кварки и не могли быть рождены по-отдельности. (Существование такого типа тяжелого кварка было предсказано ранее Шелдоном Глэшоу, Джоном Иллиопулосом и Лучано Майани как способ избежать ряда проблем теории слабых взаимодействий, а масса этого кварка была теоретически оценена Мари Гайар и Беном Ли. Частица J/ψ (читается джей-пси) была предсказана Томасом Appelqvistом и Дэвидом Политцером.)
- ¹⁴⁸ *Bunge M.* A Critical Examination of the New Sociology of Science // *Philosophy of the Social Sciences* 21 (1991): 524 [Part 1] and *ibid.*, 22 (1991): 46 [Part 2].
- 234
- ¹⁴⁹ *Kuhn T.* The Structure of Scientific Revolution, 2nd ed., enlarged (Chicago: University of Chicago Press, 1970). (Рус. пер. *Кун Т.* Структура научных революций. М: АСТ, 2002.)
- ¹⁵⁰ *Traweek S.* Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy Physicists (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1988).
- ¹⁵¹ *Chubin D. E. and Hackett E. J.* Peerless Science: Peer Review and U.S. Science Policy (Albany, N. Y.: State University of New York Press, 1990); цитируется в книжном обозрении 5. *Treiman* // *Physics Today*, October 1991, p. 115.
- ¹⁵² *Pickering A.* Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics (Chicago: University of Chicago Press, 1984).
- ¹⁵³ Аналогичные взгляды были высказаны в ранних работах Фейерабенда (более 20 лет назад), но с тех пор он изменил их. Тревик заботливо обходит этот вопрос. Она выражает симпатию точке зрения физиков, что электрон существует, признавая, что в своей работе она считает уместным полагать, что существуют физики.
- ¹⁵⁴ Более подробно об этом см. *Science and Its Public: The Changing Relationship* / Ed. G. Holton and W. Blaupied

(Boston: Reidel, 1976), а также *Holton G.* How to Think About the "Anti-science Phenomenon" // Public Understanding of Science 1 (1992): 103.

¹⁵⁵ *Feyerabend P.* Explanation, Reduction, and Empiricism.

¹⁵⁶ *Harding S.* The Science Question in Feminism (Ithaca, N. Y: Cornell University Press, 1986), p. 250.

¹⁵⁷ *Roszak T.* Where the Wasteland Ends (Garden City, N.Y.: Doubleday, Anchor Books, 1973), p. 375.

¹⁵⁸ Недавно, откликаясь на неуклюжую социологическую интерпретацию научного прогресса, генетик из Лондонского университета Дж. Джонс заметил, что «социология науки имеет такое же отношение к самой научной деятельности, как порнография к сексу: это дешевле, легче и, поскольку ограничено только воображением, значительно забавнее».

¹⁵⁹ Редакционная статья в журнале Nature 356 (1992): 729. Министр в обсуждаемом вопросе — Дж. Уолден.

¹⁶⁰ *Appleyard B.* Understanding the Present (London: Picador, 1992).

¹⁶¹ *Holton G.* How to Think About the End of Science // The End of Science / Ed. R. Q. Elvee (Lanham, Minn.: University Press of America, 1992).

¹⁶² Возможно, что нейтрино и даже фотоны имеют массы, но столь малые, что не поддаются обнаружению, но эти массы существенно отличались бы от масс электронов и *W* и *Z* частиц, что не соответствовало бы ожиданиям, если бы в природе явно проявлялась симметрия между этими частицами.

¹⁶³ Например, уравнение, утверждающее, что отношение массы *u*-кварка к массе *d*-кварка плюс отношение массы *d*-кварка к массе *u*-кварка равно 2,5, очевидно симметрично относительно обоих кварков. Оно имеет два решения: в одном масса *u*-кварка вдвое больше массы *d*-кварка, в другом масса *d*-кварка вдвое больше массы *u*-кварка. У этого уравнения нет решения, отвечающего равным массам, поскольку тогда оба отношения равнялись бы 1, а их сумма равнялась бы 2, а не 2,5.

¹⁶⁴ Направление этого магнитного поля определяется любым случайным магнитным полем, например полем Земли. Важно, что напряженность возни-

235

кающего в железе магнитного поля одинакова, вне зависимости от того, каким бы слабым ни было случайное внешнее поле. Если нет сильного внешнего магнитного поля, направление намагниченности внутри железа разное в разных «доменах», и те магнитные поля, которые спонтанно возникают внутри отдельных доменов, взаимно уничтожаются во всем куске магнита. Домены можно выстроить в одном направлении, поместив охлажденный кусок железа в сильное внешнее магнитное поле. Даже если затем выключить внешнее поле, намагниченность сохраняется.

¹⁶⁵ Эта симметрия нарушена не полностью. Остающаяся ненарушенная симметрия (известная как электромагнитная калибровочная инвариантность) обеспечивает равенство нулю массы фотона. Но и эта остаточная симметрия нарушается в сверхпроводнике. Действительно, что такое сверхпроводник? По существу, это не что иное, как кусок вещества, в котором нарушена электромагнитная калибровочная инвариантность.

¹⁶⁶ Это было сделано К. Коуэном и Ф. Райнесом.

¹⁶⁷ В том числе Ф. Энглерт и Р. Браут, а также Г. Гуральник, К. Хаген и Т. Киббл.

¹⁶⁸ За счет этого нового взаимодействия *произведения* полей любых частиц могут приобрести вакуумные средние значения, нарушающие электрослабую симметрию, хотя вакуумные средние значения отдельных полей остаются при этом равными нулю. (Знакомым свойством вероятностей является то, что произведение величин может иметь ненулевое среднее значение, даже если средние значения отдельных величин равны нулю. Например, средняя высота океанских волн над уровнем моря, по определению, равна нулю, но среднее значение квадрата высоты океанских волн, т. е. произведения высоты на саму себя, не равно нулю.) Это новое взаимодействие может оставаться необнаруженным, если оно действует только на пока что не найденные гипотетические очень тяжелые частицы.

¹⁶⁹ Эти теории были независимо разработаны Ленни Сасскиндом из Стэнфорда и мной. Чтобы отличить предложенный в них новый тип сверхсильных взаимодействий от знакомых сильных «цветовых» взаимодействий, связывающих кварки внутри протонов, эти взаимодействия по предложению Сасскинда называли *техницветом*. Трудности с идеей техницвета связаны с тем, что в ней не учитываются массы кварков, электронов и т. п. Путем разных ухищрений можно придать этим частицам массы и не вступить в противоречие с экспериментом, но тогда сама теория становится настолько вычурной и искусственной, что к ней трудно относиться серьезно.

¹⁷⁰ Теории, объединяющие сильные и электрослабые взаимодействия, часто называют теориями великого объединения. Конкретные варианты таких теорий предлагались Джогешем Пати и Абдусом Саламом, Говардом Джорджи и Шелдоном Глэшоу, и многими другими.

Речь идет о работе, написанной Говардом Джорджи, Элен Квинн и мной. Точнее, предсказывается ровно одно отношение этих констант. Когда в 1974 г. предсказание было сделано, оно поначалу казалось ошибочным: теория предсказывала значение 0,22, а из опытов по рассеянию нейтрино следовало, что значение отношения равно 0,35. С течением времени экспериментальное значение этой величины уменьшалось, и сейчас оно

236

очень близко к предсказываемой величине 0,22. Однако измерения и теоретические расчеты достигли сейчас такой точности, что мы можем различать расхождение между ними на уровне нескольких процентов. Мы увидим далее, что существуют теории (подчиняющиеся новому типу симметрии, известной как суперсимметрия), которые естественным образом объясняют это остающееся расхождение.

¹⁷³ Суперсимметрия была предложена как захватывающая возможность Юлиусом Вессом и Бруно Zumino в 1974 г., но с тех пор интерес к суперсимметрии проявлялся только в связи с решением проблемы иерархии. (Другие варианты суперсимметрии были предложены в более ранних работах Ю. А. Гольфанда и Е. П. Лихтмана, а также Д. В. Волкова и В. П. Акулова, но в этих работах на раскрывалось физическое значение

суперсимметрии, так что они не привлекли внимания. По крайней мере частично, Весс и Зумино были вдохновлены работами 1971 г. по теории струн П. Рамона, А. Неве и Дж. Шварца и Ж.-Л. Жервэ и Б. Сакиты.)

¹⁷⁴ До возникновения суперсимметрии считалось, что никакая симметрия не может запретить такие массы. Отсутствие масс у таких частиц, как кварки и электроны, фотон, W - и Z -частицы и глюоны, в уравнениях первоначальной версии стандартной модели неразрывно связано с тем, что у этих частиц есть спин. (Знакомое явление поляризации света есть прямое следствие наличия спина фотона.) Однако для того, чтобы поле имело ненулевое вакуумное среднее, нарушающее электрослабую симметрию, это поле должно быть бесспиновым. В противном случае, вакуумное среднее будет нарушать также симметрию вакуума по отношению к изменению направлений, что грубо противоречит наблюдениям. Суперсимметрия решает проблему, устанавливая связь между бесспиновым полем, вакуумное среднее которого нарушает электрослабую симметрию, и различными полями со спином, которым электрослабая симметрия запрещает иметь массы, входящие в полевые уравнения. У суперсимметричных теорий много своих проблем: суперпартнеры известных частиц не обнаружены, следовательно, они должны быть намного тяжелее, и поэтому сама суперсимметрия должна нарушаться. Существует ряд интересных предложений о механизме нарушения суперсимметрии, причем некоторые из них включают гравитационное взаимодействие, однако, вопрос все еще открыт.

¹⁷⁵ В той версии стандартной модели, которая основана на введении нового сверхсильного взаимодействия (техницвета), можно обойти проблему иерархий, поскольку массы вообще не входят в уравнения, описывающие физику при энергиях много меньше планковской. Вместо этого шкала масс частиц W и Z , а также других элементарных частиц стандартной модели, определяется тем, как изменяются с энергией константы техницветового взаимодействия. Считается, что техницветовое взаимодействие, а также сильное и электрослабое взаимодействия, имеют общую константу при энергии, близкой к энергии Планка. С уменьшением энергии константа будет расти очень медленно, так что цветное взаимодействие будет недостаточно сильным, чтобы нарушить любую симметрию, пока энергия не уменьшится до величины, намного меньше планковской энергии. Вполне вероятно, что без всякой тонкой настройки параметров теории, техницветовое взаимодействие будет расти с уменьшением энергии чуть быстрее, чем обычное цветное взаимодействие,

237

так что оно породит массы W - и Z -частиц, близкие к наблюдаемым, в то время как обычное цветное взаимодействие, действуя в одиночку, породит в тысячу раз меньшие массы этих частиц.

Суперсимметрия сопоставляет всем известным кваркам, фотонам и т. д. «суперпартнеров» другого спина. Хотя ни одна из этих частиц не наблюдалась, теоретики не замедлили дать им имена: суперпартнеры (нулевого спина) частиц типа кварков, электронов и нейтрино, называются скварками, сэлектронами и снейтрино, а суперпартнеры (полуцелого спина) фотона, W , Z и глюонов называются фотино, вино, зино и глюино. Я как-то предложил называть этот местный жаргон «лангино»⁴⁾, но Гелл-Манн предложил лучший термин «сязык». Совсем недавно идея суперсимметрии получила мощный толчок от экспериментов по распаду Z -частицы в ЦЕРНе. Как отмечалось выше, эти эксперименты сейчас настолько точны, что можно говорить о небольшом (порядка 5 %) расхождении между предсказанным в 1974 г. отношением констант, равным 0,22, и наблюдаемым значением. Интересно, что расчеты, учитывающие существование скварков и глюино, а также всех остальных требуемых суперсимметрией новых частиц, приводят к таким изменениям констант взаимодействия, которые вполне достаточны, чтобы привести к согласию между теорией и экспериментом.

¹⁷⁷ Впервые это было обнаружено в 1968 г. при сравнении экспериментальных результатов Рея Дэвиса с расчетами Джона Бакала ожидаемого потока солнечных нейтрино.

¹⁷⁸ Это было предложено в 1985 г. С. П. Михеевым и А. Ю. Смирновым на основе более ранней работы Линкольна Вольфенштейна. Независимо Йоширо Намбу, Хольгером Нильсенсом и Леонардом Сасскиндом.

¹⁸⁰ Это замечание принадлежит Эдварду Виттену.

¹⁸¹ Некоторые из этих трудностей можно преодолеть только путем наложения симметрии, которую позднее называли суперсимметрией, так что такие теории часто называют теориями *суперструн*.

¹⁸² Хотя такая нежелательная частица возникает в теориях струн как мода колебаний *замкнутой* струны, не удастся избежать появления этой частицы, рассматривая только открытые струны, так как при соударениях открытых струн обязательно образуются замкнутые струны.

¹⁸³ К этому выводу пришли независимо Ричард Фейнман и я.

¹⁸⁴ Это было впервые предложено в 1974 г. Дж. Шерком и Дж. Шварцем и независимо Т. Йонейя.

¹⁸⁵ Цит. по *Horadan J.* // Scientific American, November 1991, p. 48.

Действительно, теорию струн можно рассматривать как теорию частиц, отвечающих различным модам колебаний струны, но из-за бесконечно большого числа сортов частиц в любой струнной теории она отличается от обычных квантовых теорий поля. Например, в квантовой теории поля испускание и обратное поглощение одного сорта частиц (скажем, фотона) приводит к бесконечному сдвигу энергии — в правильно сформулированной теории струн эта бесконечность сокращается благодаря

¹⁸⁶ По-русски это звучало бы как «языкино». — *Прим. перев.*

238

эффектам испускания и поглощения частиц, принадлежащих бесконечному числу других типов.

¹⁸⁷ Эта несогласованность в теории струн была чуть ранее обнаружена Виттеном и Луисом Альварес-Гауме.

¹⁸⁸ Филип Канделас, Гарри Горовиц, Эндрю Строминджер и Эдвард Виттен.

¹⁸⁹ Дэвид Гросс, Джеффри Харви, Эмиль Мартинес и Райан Ром.

¹⁹⁰ Конформная симметрия основана на факте, что при движении множества струн в пространстве, они замечают в пространстве-времени двумерную поверхность. Каждая точка на поверхности имеет метку, задающую момент времени, и другую метку определяющую координату вдоль одной из струн. Как и для любой другой поверхности, геометрия этой замеченной струнами двумерной поверхности описывается выражением для

расстояния между любой парой очень близких точек, записанного через координатные метки. Принцип конформной инвариантности утверждает, что уравнения, управляющие движением струн, сохраняют свою форму, если мы изменим способ измерения расстояний, умножив все расстояния между какой-то точкой и любой соседней точкой на величину, произвольным образом зависящую от положения первой точки. Конформная симметрия необходима потому, что в противном случае колебания струны в направлении оси времени приведут (согласно одной из формулировок теории) либо к отрицательным вероятностям, либо к нестабильности вакуума. При наличии конформной симметрии эти времениподобные колебания могут быть устранены из теории преобразованием симметрии, и поэтому безвредны.

¹⁹¹ Термин «антропный принцип» ввел Б. Картер. См., например, *Confrontation of Cosmological Theories with Observation* / Ed. M. S. Longair (Dordrecht: Reidel, 1974); *Carter B. The Anthropic Principle and Its Implications for Biological Evolution* // *The Constants of Physics* / Ed. W. McCrea and M.J. Rees (London: Royal Society 1983), p. 137; *Barrow J. D. and Tipler F.J. The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Clarendon Press, 1986); *Gribbin J. and Rees M. Cosmic Coincidences: Dark Matter, Mankind, and Anthropic Cosmology* (New York: Bantam Books, 1989), chap. 10; *Leslie J. Universes* (London: Routledge, 1989).

¹⁹² Салпетер в своей статье 1952 года также говорит о том, что И. Опик выдвигал эту идею в 1951 году.

¹⁹³ С Хойлом работали Д. Н. Ф. Данбар, В. А. Венцель, В. Уолинг.

¹⁹⁴ На самом деле, уровни энергии кислорода также должны обладать специальными свойствами, чтобы не допустить превращения всего углерода в кислород.

¹⁹⁵ В группу входили М. Ливин, Д. Холловелл, А. Вейс и Дж. В. Труран.

¹⁹⁶ Конкретно, на 60 кэВ. Это, конечно, очень маленькая энергия по сравнению с разностью в 7,644 МэВ между энергиями этого нестабильного состояния и стабильного наинизшего состояния углерода. Но не требуется никакой тонкой настройки, чтобы сделать энергию этого нестабильного состояния ядра углерода равной с такой же точностью энергии ядра бериллия-8 и ядра гелия, поскольку в хорошем приближении соответствующие состояния ядер углерода и бериллия являются просто слабо связанными ядерными молекулами, состоящими из трех или двух ядер

239

гелия. (Я благодарен моему коллеге Вадиму Каплуновскому из Техасского университета за это замечание.)

¹⁹⁷ Эта версия антропного принципа иногда называется слабым антропным принципом.

¹⁹⁸ *Hoyle F. Galaxies, Nuclei, and Quasars* (London: Heinemann, 1965).

¹⁹⁹ Строго говоря, эти «кротовые норы» возникают математически в том подходе к квантовой гравитации, которая известна как евклидово интегрирование по траекториям. Неясно, какое отношение все это может иметь к реальным физическим процессам.

²⁰⁰ Коулмен продолжал настаивать (как Баум и Хокинг ранее), что вероятности этих констант имеют бесконечно высокие пики при определенных значениях, так что с подавляющей вероятностью константы примут эти конкретные значения. Однако такой вывод базируется на математической формулировке (в виде евклидова интеграла по траекториям) квантовой космологии, согласованность которой находится под вопросом. Трудно быть полностью уверенным во всем этом, поскольку мы имеем дело с гравитацией в квантовой области, т. е. там, где наши уравнения уже неадекватны.

²⁰¹ Чтобы вновь показать, насколько бывает сложной история науки, замечу, что сразу же после работы Эйнштейна 1917 г. по космологии его друг Биллем де Ситтер указал на то, что уравнения гравитационного поля Эйнштейна, модифицированные путем включения космологической постоянной, имеют другой класс решений, также по внешнему виду статических, но не содержащих (или почти не содержащих) материи. Это разочаровало Эйнштейна, так как в его решении космологическая постоянная связана со средней космической плотностью материи, в согласии с теми идеями, которые Эйнштейн почерпнул у Маха. Кроме того, решение Эйнштейна (с материей) на самом деле нестабильно: любое малое возмущение переведет его в конце концов в решение де Ситтера. Чтобы еще больше запутать дело, отмечу, что модель де Ситтера только приближенно статична. Хотя пространственно-временная геометрия в использованной де Ситтером координатной системе не изменяется со временем, любые малые пробные частицы, помещенные в его вселенную, будут разлетаться друг от друга. На самом деле, когда в начале 1920 г. в Англии стали известны измерения Слайфера, они были сначала интерпретированы Эддингтоном в рамках решения де Ситтера уравнений Эйнштейна *при наличии* космологической постоянной, которое также является статическим, а не с помощью первоначальной теории Эйнштейна, приводящей к нестатическому решению!

²⁰² *Abbott L. // Scientific American* 258, no. 5 (1985): 106.

²⁰³ Мы не можем даже надеяться, что найдется механизм, с помощью которого вакуумное состояние потеряет энергию, перейдя в состояние с более низкой энергией и, следовательно, меньшей космологической постоянной, и в конце концов спустится в состояние с нулевой полной космологической постоянной, так как некоторые из этих возможных вакуумных состояний в теориях струн уже обладают большой *отрицательной* полной космологической постоянной.

240

²⁰⁴ Если обнаружится меньшая или большая плотность, то сразу возникнет вопрос, почему расширение продолжалось миллиарды лет — все еще замедляется.

²⁰⁵ *Popper K. R. Objective Knowledge: An Evolutionary Approach* (Oxford: Clarendon Press, 1972), p. 195. (Рус. пер. *Поппер К. Р. Объективное знание. Эволюционный подход*. М.: УРСС, 2002.)

²⁰⁶ *Redhead M. Explanation*. August 1989.

²⁰⁷ Интересное обсуждение этой возможности дается в книге *Davies P. What Are the Laws of Nature* // *The Reality Club #2* / Ed. John Brockman (New York: Lynx Communications, 1988).

²⁰⁸ *Wheeler J. A. Beyond the Black Hole* // *Some Strangeness in the Proportion: A Centennial Symposium to*

Celebrate the Achievements of Albert Einstein / Ed. H. Woolf (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980), p. 341.

²⁰⁹ *Nielsen H. B.* Field Theories Without Fundamental Gauge Symmetries // The Constants of Physics / Ed. W. McCrea and M.J. Rees (London: Royal Society, 1983), p. 51; перепечатано в Philosophical Transactions of the Royal Society of London A310 (1983): 261.

Wigner E. P. The Limits of Science // Proceedings of the American Philosophical Society 94 (1950): 422. (На русском языке опубликована в книге: *Вигнер Э. П.* Инвариантность и законы сохранения. Этюды о симметрии. М.: УРСС, 2002.)

²¹¹ *Redhead M.* Explanation.

²¹² *Nozick R.* Philosophical Explanation (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1981), chap. 2.

²¹³ Psalms 19: 1 (версия короля Джеймса)⁵⁾.

²¹⁴ *Hawking S.* A Brief History of Time (London: Bantam Books, 1988). (Рус. пер. *Хокинг С.* Краткая история времени. М.: Амфора, 2003); *Tkefil J.* Reading the Mind of God (New York: Scribner, 1989) и *Davies P.* The Mind of God: The Scientific Basis for a Rational World (New York: Simon & Schuster, 1992).

²¹⁵ *Misner C. W.* // Cosmology, History, and Theology / Ed. W. Yourgrau and A.D.Breck (New York: Plenum Press, 1977), p. 97.

²¹⁶ Цит. по *Holton G.* // The Advancement of Science, and Its Burdens (Cambridge: Cambridge University Press, 1986), p. 91.

²¹⁷ *Einstein A.* Festschrift für Aunel Stadola (Zurich: Orell F'ussli Verlag, 1929), p. 126.

²¹⁸ П. Тиллих, выступление в университете Северной Каролины 1960, цит. по *De Witt B.* Decoherence Without Complexity and Without an Arrow of Time University of Texas Center of Relativity preprint, 1992.

²¹⁹ Это взято из неопубликованной стенограммы слушаний.

²²⁰ Взято из интервью в «Нью-Йорк Таймс», апрель 25, 1929. Я благодарен А. Пайсу за эту цитату.

²²¹ Работы Галилея показали, что мы на Земле не должны чувствовать движения Земли вокруг Солнца. Кроме того, его открытие лун Юпитера стало демонстрацией Солнечной системы в миниатюре. Завершающее доказательство связано с открытием фаз Венеры, что никак не согласовывалось с предположением, что Венера и Солнце вращаются вокруг Земли.

⁵⁾ Псалтырь. Псалом 18. — *Прим. ред.*

241

²²² Обращаясь вокруг Земли вместо того, чтобы улететь по прямой в открытый космос, Луна за каждую секунду приобретает компоненту скорости, равную 0,1 см/с по направлению к Земле. Теория Ньютона объяснила, что это в 3 600 раз меньше, чем ускорение падающего яблока в саду Кембриджа, так как Луна в шестьдесят раз дальше от центра Земли, чем Кембридж, а ускорение за счет силы тяготения уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния.

²²³ *Perutz M. E.* Erwin Schrödinger's What Is Life? and Molecular Biology // Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath / Ed. C. W. Kilmeister (Cambridge: Cambridge University Press, 1987), p. 234.

²²⁴ Я впервые услышал о профессоре Джонсоне, когда мой друг показал мне его статью «Эволюция как догма». См. A Monthly Journal of Religion and Public Life, October 1990, pp. 15-22.

²²⁵ *Gould S.* Impeaching a SelfAppointed Judge // Scientific American, July 1992, p. 118.

²²⁶ *Polkinghorne J.* Reason and Reality: The Relation Between Science and Theology (Philadelphia: Trinity Press International, 1991).

²²⁷ Более подробно см. *Levinson S.* Religious Language and the Public Square // Harvard Law Review 105 (1992): 2061; *Midgley A.* Science as Salvation: A Modern Myth and Its Meaning (London: Routledge, 1992).

²²⁸ *Lightman A. and Brawer R.* Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990).

²²⁹ *Sontag S.* Piety Without Content // Against Interpretation and Other Essays (New York: Dell, 1961). (Рус. пер. *Зонтаг С.* Против интерпретации. Сб. статей. М., 1988.)

²³⁰ *Trevor-Roper H. R.* The European Witch-Craze of the Sixteenth and Seventeenth Centuries, and Other Essays (New York: Harper & Row, 1969).

²³¹ *Popper K.R.* The Open Society and Its Enemies (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1966), p. 244. (Рус. пер. *Поппер К.Р.* Открытое общество и его враги. М., 1992.)

²³² См. его Трактат о природе человека (1739).

²³³ *Bede A.* History of the English Church and People / Trans. Leo Sherley-Price and rev. R. E. Latham (New York: Dorset Press, 1985), p. 127.

²³⁴ Цит. по работе Science 221 (1983): 1040.

²³⁵ Туннель установки ИЗАБЕЛЛА используется сейчас для релятивистского ускорителя тяжелых ионов, который будет использоваться для изучения столкновений тяжелых ионов с целью понять свойства ядерной материи, а не фундаментальные принципы физики элементарных частиц. Ожидается, что этот ускоритель будет готов в 1997 г.

²³⁶ Это замечание применимо к неоднородностям галактического размера, но не значительно большим неоднородностям, следующим из измерений COBE. Они настолько велики, что даже световая волна не успела бы их пересечь за первые триста тысяч лет после начала современного расширения Вселенной, и поэтому (независимо от того, состоят они из темной материи или нет) они не могли испытать существенного роста за это время.

²³⁷ После того, как местом строительства был выбран округ Эллис, в спорах возник новый элемент — зазвучали обвинения со стороны разочаро-

242

ванных политиков из таких штатов, как Аризона, Колорадо и Иллинойс, что Техас выиграл соревнование в выборе места строительства в результате нечестного политического давления. Широко обсуждался тот факт, что выбор министерством энергетики штата Техас в качестве места строительства ССК был объявлен буквально через два дня после избрания президентом США губернатора Техаса Джорджа Буша. После того, как решение о месте строительства ССК было обнародовано, министр энергетики Херрингтон заявил, что специальная комиссия министерства, которая установила рейтинг семи «самых подходящих» мест, была изолирована от политического давления, что он сам не получал выводов комиссии до дня выборов президента, что специальная комиссия сочла место в Техасе безусловно наилучшим, и что только после этого он получил одобрение окончательного решения от президента Рейгана и вновь избранного президента Буша. Я вполне могу поверить, что процесс отбора мог бы быть ускорен так, чтобы объявить решение перед выборами, но тогда это, несомненно, вызвало бы обвинения в том, что момент объявления был выбран специально, чтобы повлиять на важный голос штата Техас. С другой стороны, даже если избрание Джорджа Буша никак не повлияло на выбор места, министерство энергетики, безусловно, было хорошо осведомлено о влиятельности членов Конгресса от Техаса и их полном одобрении ССК, так что можно было надеяться, что решение о месте строительства в Техасе улучшит шансы проекта ССК на получение финансирования от Конгресса. Если так, то это вряд ли следует рассматривать как скандал или как первый и последний случай, когда правительственное агентство занимается подобными расчетами. Во всяком случае, я могу засвидетельствовать, что подобные расчеты не играли никакой роли в выборе семи самых предпочтительных мест комитетом национальных академий, в который я входил. Наш комитет с самого начала рассматривал место в Техасе в качестве одного из главных претендентов. Частично это было связано с исключительно удачными геологическими условиями. Другим важным фактором было наличие крикливой оппозиции строительству ССК в нескольких других, входивших в список наилучших местах, в том числе в лаборатории им. Ферми в штате Иллинойс. В округе Эллис практически каждый житель был рад приветствовать строительство ССК.²³⁸ См., например, R. Darman, цит. по: *Aldhous P.* Space Station Back on Track // *Nature* 351 (1991): 507.

Именной указатель

Ааронов Якир 7
Августин Блаженный 137
Авогадро Амедео 139
Акулов В. П. 236
Александр Македонский 13
Альварес-Гауме Луис 238
Альдхаус П. 242
Анаксимен 11
Андерсон Филипп 35, 42, 47-49, 52
Аппельквист Томас 233
Аристотель 12, 13, 109, 129, 219
Армстронг Нейл 124
Арнольд Мэтью 199
Аррениус Сванте 77
Архимед 13
Аспект Алан 225
Бадаш Лоуренс 219
Бакал Джон 237
Бамперс Дейл 210
Бардин Вильям 230
Бардин Джон 222
Барроу Дж. Д. 238
Баум Эрик 239
Беда Достопочтенный 202
Бекенштейн Джекоб 35
Беккерель Анри 16, 92
Белл Джон 66
Бернсайд Амброз 103
Бернштейн Джереми 232, 233
Бете Ганс 90
Био Жан-Батист 98
Боббитт Филип 7, 220
Бозе Сатьендра Нат 26
Боксер С. 219
Больцман Людвиг 36, 139
Больяи Янош 230, 231
Бонди Герман 31
Бор Нильс 17, 22, 55, 57, 60-62, 88, 120, 138
Борн Макс 56, 59, 61, 82, 86, 112, 227
Бравер Роберта 198
Браге Тихо 84
Браут Р. 235
Браш Стефен 221, 226
Брейт Грегори 231
Бреннер Сидней 7, 39
Бройль Луи де 57—59
Бруно Джордано 191
Бунге Марио 233
Буш Джордж 215, 242
Бэкон Френсис 83
Вайнберг Альвин 50, 51
Вайнберг Луиза 7, 232
Вайнберг Элизабет 7
Вайскопф Виктор 89, 90, 227, 228
Валлер Айвар 86
Ван Флек Джон 50
Вейль Герман 122, 230
Венециано Габриэле 166, 167
Берн Жюль 124
Вигнер Юджин 112, 122, 124, 133, 182, 232, 240
Вильсон Кеннет 127
Вильсон Роберт 229
Вильчек Фрэнк 101, 143, 233
Витгенштейн Людвиг 27, 132, 133, 220
Виттен Эдвард 168, 237, 238
Вишняк Этан 7
Вожичка Стенли 205

Вокулер Жерар 198
Волков Д. В. 236
Вольтер 134
Вольфенштейн Линкольн 237
Ву Ценшун 229
Вулгар Стив 146
Гайар Мари 233
Галилей Галилео 14, 56, 70, 149, 191, 213,
240 Галуа Эварист 124, 231
Гамов Г. А. 54, 97
Гарвин Ричард 229
Гаусс Карл Фридрих 121, 122, 230, 231
Гейзенберг Вернер 33, 55-60, 86, 112, 119, 135, 138, 141, 142, 153, 227, 230
Гейл Джордж 7, 132, 138
Геллер Маргарет 198
Гелл-Манн Мюррей 123, 124, 142, 225, 228, 230, 233, 237
Гепхардт Ричард 217
Гиббон Эдвард 6
Гиббонс Джек 217
Гиббс Джосайя Уиллард 36, 139
244
Гизин Н. 71
Гильберт Давид 82
Гильберт Лоуренс 7
Гиссинг Джордж 40
Глейк Джеймс 7, 51, 52, 223
Глисон Эндрю 230
Глэшоу Шелдон 95, 233, 235
Голд Томас 31
Гольфанд Ю. А. 236
Горовиц Гарри 238
Грин Майкл 169
Грин Питер 7, 14
Гринберг О. 230
Гросс Дэвид 7, 25, 143, 233, 238
Гроссман Марсель 121
Гулд Стивен 194
Гуральник Г. 235
Гут Алан 232
Давид, царь 188
Дайн Майкл 229
Дальтон Джон 139, 140
Данбар Д. 238
Дарвин Чарльз 20, 29, 103, 191
Дарроу Карл 219
Де Витт Брайс 7
Декарт Рене 14, 133, 134
Демокрит 11-13, 133, 139, 143, 161
Джексон Майлс 7
Джолли Филипп 16
Джонс Дж. 234
Джонсон Филип 192-194, 241
Джонстон Беннет 216, 217
Джорджи Говард 100, 235
Дирак Поль Адриан Морис 18, 56, 57, 86, 89, 91, 92, 105, 119, 120, 126, 181, 224, 227, 230
Достоевский Федор 45, 222
Дэвис Рей 237
Дюгем Пьер 99
Евклид 121, 125, 126, 231
Жерве Ж.-Л. 236
Жомини Анри 229
Зигфрид 8
Зоммерфельд Арнольд 82
Зонтаг Сьюзен 200, 241
Иллиопулос Джон 233
Иордан Паскуаль 56, 86, 112, 227
Канделас Филип 68, 238
Кант Иммануил 134, 136, 138
Каплуновский Вадим 239
Капра Фритьоф 63

Карнап Рудольф 138
Карно Никола Леонард Саді 35
Картан Эли 123, 124
Картер Брендон 238
Кассен Б. 231
Кауфманн Вальтер 140, 233
Квинн Элен 228, 235
Кейворт Джордж 205
Кельвин *см.* Уильям Томсон
Кендалл Генри 233
Кеплер Иоганн 14, 26, 84, 128, 129, 232
Керри Боб 217
Киббл Томас 235
Ким Дж. 229
Кинсайд Г. 232
Клаузевиц Рудольф Юлиус Эммануил
229 Клинтон Билл 215
Кондон Ю. 231
Коперник Николай 103, 191
Коулмен Сидни 7, 34, 173, 239
Коуэн Клайд 235
Коши Огюстен Луи 126
Крамерс Г. 227
Крик Фрэнсис 7, 47, 127
Кролл Норман 228
Куин У. ван 99
Кук Фредерик 180
Кун Томас 144, 145, 234
Купер Леон 222
Лайтман Алан 198
Ламарк Жан Батист 103
Ландау Лев 228
Ланжевен Поль 82
Лаплас Пьер Симон 227
Латур Бруно 146
Левкипп 11, 133, 139, 143, 161
Ледерман Леон 229
Лейк Констанс 92
Лейтвилер Г. 233
Ленин Владимир Ильич 134, 135
Ли Бенджамен 96, 99, 233
Ли Дзунтао 229
Ли Роберт 103, 229
Ли Софус 123, 124
Либих Юстус 191
Ливіо М. 238
Лиддел Гарт Бэзил 229
Линде А. Д. 137
Лихтман Е. П. 236
Ллойд Джордж Дэвид 40
245
Лобачевский Н. И. 230, 231
Лонгстрит Джеймс 229
Лоренц Хендрик 82
Лоу Френсис 228, 233
Лоуренс Эрнст 117, 206, 213
Лэмб Уиллис 88-90, 227, 228
Майани Лучиано 233
Майкельсон Альберт 15—17, 181
Маймонид Моисей 137
Майр Эрнст 7, 45, 46, 48, 52, 192
Максвелл Джеймс Клерк 19, 36, 38, 59, 79, 134, 139
Маркс Карл 134
Мартинес Эмиль 238
Маршак Роберт 228
Мах Эрнст 113, 138, 139, 141, 144, 232, 239
Мертон Роберт 145
Мефистофель 10
Мид Джордж 103
Мизнер Чарльз 188

Милль Джон Стюарт 83
Михеев С. П. 237
Мойнихен Дэниэл 217
Нагель Бенгт 7, 219
Нагель Эрнст 25, 36
Надлер Джеррольд 217
Намбу Йоширо 230, 237
Неве Андре 236
Нееман Ювал 123
Нильсен Хольгер 182, 237
Ницше Фридрих 90
Нозик Роберт 7, 184-186
Ньютон Исаак 13, 14, 16, 26, 31, 33, 34, 74, 79, 81, 84, 85, 107, 111, 113, 126, 133, 134, 140, 181, 191, 192, 219, 220, 227, 241
О 'Лири Хейзел 216
Оккам 40
Оман Чарльз 229
Опик И. 238
Оппенгеймер Юлиус Роберт 86—90, 93, 142
Орзаг Стефен 7
Оруэлл Джордж 201
Оствальд Вильгельм 36, 141
Пайс Абрахам 7, 19, 240
Пати Джогеш 235
Патнем Хиллари 7
Паули Вольфганг 57, 86, 112, 120, 135, 154, 200
Паунд Роберт 226
Пензиас Арно 229
Перутц Макс 192
Печчеи Роберто 228
Пикеринг Эндрю 146, 147
Пиппард Брайан 7, 38, 39
Планк Макс 16, 17, 26, 36, 56, 82, 139, 158
Платон 40, 128, 130
Подольский Борис 65, 71
Полинг Лайнус 38
Политцер Дэвид 143, 233
Полкингхорн Джон 7, 197
Польчински Джозеф 7, 71, 225
Поппер Карл 180, 201, 240, 241
Праут Вильям 140
Пресс Уильям 7
Примас Ганс 38
Птолемей 103
Пуанкаре Анри 32, 106
Раби Исидор 91
Райль Гильберт 39
Рамануджан С. 230
Рамон Пьер 236
Рассел Бертран 200
Ребка Г. 226
Редхед Майкл 7, 181, 184
Резерфорд Эрнест 17, 28
Рейган Рональд 209, 211, 215, 242
Рентген Вильгельм 16
Риман Георг Фридрих Бернгард 56, 81, 121, 122
Риттер Дон 189, 190, 210
Рихтер Бартон 233
Робинсон Джозеф 222
Рожак Теодор 148
Розен Натан 65, 71
Ром Райан 238
Руббиа Карло 101
Рубин Гарри 48
Рэлей, лорд 139
Сакита Бунжи 236
Салам Абдус 95-97, 99, 118, 154, 219, 235
Самбурски Шмуэль 77, 233
Самиос Николас 205, 231
Сасскинд Леонард 7, 233, 235, 237

Ситтер Биллем де 239
Слайфер Весто 174, 239
Смирнов А. Ю. 237
Солпитер Эдвин 172
Софокл 118
Спиноза Барух 190
246
Средницки Марк 229
Сударшан Ю. 228
Сун Цзы 229
Тайгнер Маури 209
Тацит Корнелий 6
Тейлор Ричард 233
Телегди Валентин 229
Теллер Эдвард 97
Тернер Эдвин 198
Тиллих Поль 189, 240
Тинг Сэмюэл 233
Томонага Синитиро 91, 222
Томсон Уильям (лорд Кельвин) 15, 16
Томсон Дж. Дж. 16, 28, 139-141, 143, 213
Траерн Томас 106
Тревик Шарон 145, 234
Түве Мерле 231
'т Хофт Герард 96, 99, 233
Тьюринг Алан 47
Уилер Джон Арчибальд 142, 182, 184, 195
Уоллес Альфред 29, 191
Уорд Джон 95
Уотсон Джеймс 47, 127
Фавелл Гаррис 189, 190
Фалес 11-13, 187
Фарадей Майкл 134
Фауст 10
Фейерабенд Пауль 7, 133, 148, 232, 234
Фейнман Ричард 91, 96, 135, 228, 237
Ферми Энрико 6, 93, 94, 96, 227
Финберг Юджин 231
Финк Манфред 7
Фисс Оуэн 232
Фишер Майкл 7, 127
Фишер Рональд 37
Фишлер Вилли 229
Фок В. А. 135
Фраунгофер Йозеф 213
Фрейндлих Эрвин 83
Френель Огюстен 59
Френч Дж. 228
Фридман Джером 229, 233
Фритч Гаральд 233
Хаббл Эдвин 174, 191
Хаген К. 235
Хаксли Томас Генри 21, 27, 29, 30, 212, 213 Хан М. 230
Ханкинсон Роберт 7, 219
Харви Джеффри 238
Харди Г. 120, 230
Хардинг Сандра 7, 148
Хартль Джеймс 32, 173, 225
Хафстад Л. 231
Хейденберг Н. 231
Херрингтон Джеймс 242
Хиггс Питер 154
Хойл Фред 31, 172, 173, 238
Хокинг Стивен 32, 35, 137, 173, 181, 188, 239, 240
Хоффман Роальд 7, 38
Хуанг Керзон 230
Цвейг Джордж 142
Цермело Эрнст 36
Чандрасекар Субраманьян 229
Чедвик Джеймс 122

Чу Джеффри 142, 233
Шапиро Поль 7
Шварц Джон 169, 236, 237
Швебер С. 7
Швингер Джулиан 91
Швиттерс Рой 7, 210
Шекспир Уильям 20, 118, 165
Шерк Джоел 237
Шефер Генри 26
Шпенглер Освальд 148
Шрёдингер Эрвин 57-62, 119, 192
Шриффер Роберт 222
Эверетт Хью 67, 182
Эдвин, король Нортумбрийский 202
Эддингтон Артур 82, 101, 221, 239
Эйзенберг Леон 7
Эйнштейн Альберт 8, 16, 17, 19, 22, 26, 52, 56, 57, 60, 65, 66, 71, 73-86, 88, 107, 111, 113, 119, 121, 122, 135, 136, 138, 141, 142, 159, 174, 175, 177, 189, 190, 192, 199, 220, 225, 226, 232, 239
Эллиот Дж. 6
Энгельс Фридрих 134
Энглерт Ф. 235
Эпикур 133
Эпплъярд Брайан 148
Эратосфен 13
Эренгафт Феликс 82
Юм Давид 201 Юнг Томас 59
Ян Роберт 42, 221
Янг Чженьнин 228-230, 233

Предметный указатель

Абдера 11
абсолютный нуль температуры 136, 137, 220
азот 124, 172
аксион 101
Александрия 13, 14, 126
алмаз 220
альтернативные науки 69
Американское физическое общество 17, 46, 205, 222
аминокислоты 30, 128
Андромеда, туманность 191
антиматерия, антикварк 143, 144, 233
—, антинейтрино 93
—, антипротон 93, 102, 206
— и античастицы 162
антропный принцип 171—174, 176, 178, 186, 238, 239
асимптотическая свобода 143
Аспен 102
астрология 14, 41—43, 187
атомные веса 28, 29
атомы, дискуссия об атомах 133
— и молекулы *см. также* электрон, энергия (атомов), ядра 11, 13, 15, 17, 22-24, 26-28, 35, 36, 55
аэродинамика 12

Белки 13, 27, 29, 30, 128
бериллия ядро 71, 172, 238
Беркли (Калифорнийский университет) *см. также* лаборатория им. Лоуренса в Беркли 26, 101, 122, 142, 206, 209, 233
Берлин 77, 83, 140, 141
Берн 16
бета-распад 92, 93, 120, 154, 229, 230
Библия 21
биология *см.* эволюция, генетика, молекулярная биология, витализм
благородные газы 220
Бог 137, 189-191, 193-195, 197, 199, 200
Божественный разум 188
большая наука 9, 145, 211
Большой Адронный коллайдер (БАК) 9
Бомбей 41
Бора интерпретация квантовой механики 60, 63, 66, 181, 195, 221
— теория атомных спектров 17
Бостон 100
Британская ассоциация 20 броуновское движение 82, 141, 227
Брукхейвенская национальная лаборатория 204
Брюссель 65, 88, 228
бэватрон 122, 206
Ваксахаки, Техас 203
вакуумное значение поля 154
вектор состояния 224
Вена 113
Венский кружок 138
вероятности в квантовой механике 63,
64, 68 верхний кварк *см.* кварки виртуальные фотоны 87—91
висмут 98-100, 228
витализм 192
внеземные цивилизации 41
внутренние симметрии 115, 122, 123, 125, 170, 171
водород *см. также* лэмбовский сдвиг 12, 13, 17, 27-29, 57, 88, 124, 138, 139, 171, 172, 227
возраст Вселенной 177, 178, 207
волновая функция 8, 17, 23, 26, 57—59, 61-68, 70, 86, 100, 142, 173, 182, 186, 195, 222-225
волновой пакет 59, 223
волновые уравнения 57
восьмеричный путь 123
вращение поляризации света 98
время 136, 137, 144
второй закон термодинамики *см.* энтропия, термодинамика
выбор места строительства ССК 8, 163, 203, 208, 210, 212, 241, 242
Галактики 31, 35, 113, 174, 176-178, 187, 207, 208, 220

- Гамбург 57
гамильтониан 62
Гамлет 118
гамма-излучение 226
Гарвардский университет 71, 100, 105, 143, 173
248
Гейзенберга квантовая теория полей 86
— первая работа по квантовой механике 56, 138
— соотношение неопределенностей 33, 60, 65, 138
гелий 31, 57, 171, 172, 209, 215, 220, 238, 239
Гельголанд 55, 56
генетика 48
—, генетический код 48, 127, 128
геометрия *см.* Евклид, неевклидова геометрия
Геттисберг 103
Геттинген 55, 59, 82
гипероны 123
главная группа конструкторов (ССК) 209
глюоны *см. также* квантовая хромодинамика 116, 143, 144, 146, 147, 156, 157, 162, 168, 185, 204, 236, 237
голые масса и заряд 89, 90, 92, 161
гравитационное излучение 52, 102, 167
гравитационные линзы 178
гравитация *см. также* общая теория относительности, законы Ньютона 19, 42, 80, 111, 114, 119, 136, 150, 158, 164, 166, 168, 173, 184, 185, 208, 221
гравитон 112, 159, 167, 168, 229
Гражданская война в США 103 группы и теория групп 123, 124
— Ли 123, 231
Даллас 9, 203, 209
Дагенс Нюхетер 97
движение против науки 147, 148
ДЕЗИ, лаборатория 213
действительная часть комплексного числа 223
дейтерий 100
декогерентность 225
демистификация 191
детерминизм 33, 63
Дирака теория электрона 86, 89, 119, 120, 227
дифракция 59, 60
длина волны света 21, 22, 24, 59
ДНК 30, 37, 45-48, 127
дополнительность 60—62

Евклидова геометрия 121, 176
единая теория поля (Эйнштейн) 158

Женева 9, 71
жесткость 85, 112, 116, 119, 169
— квантовой механики 112, 165
— общей теории относительности 85
— физических теорий 116
— электрослабой теории 97

Закон в смысле «закон природы» 13, 14
— обратных квадратов 69, 84, 85, 98, 169, 227
законы Кеплера 26, 219
— Ньютона *см. также* гравитация, закон обратных квадратов 13, 26, 33, 219
— сохранения 35, 65, 154, 162
Записки из подполья 45
звезды 13, 14, 20, 31, 32, 35, 37, 75-77, 90, 113, 155, 172, 177, 187, 188, 191, 202, 207
зеркальная симметрия 108
золотуха 53

Иерусалим 77
ИЗАБЕЛЛА 203-206, 216, 241
изотопическая симметрия 231
Икар 79
импульс 49, 57, 59-65, 71, 85, 109, 110, 112, 138, 142, 154, 195, 204, 219, 223-225
Институт научной информации 96, 228
интенсивности взаимодействий 156, 157, 168
интерпретация квантовой механики на языке многих историй 66—68, 173, 221

искусство войны и искусство науки 104, 229
истоки Нила 51
исторические случайности 33—35, 37, 45, 129

Калибровочные симметрии *см. также* локальные симметрии 25, 115, 230
кальций 21-23, 26-30, 220
Канадский комитет по сельскому хозяйству 44
— совет по науке 44
карбонат кальция 28, 29
катализ энзимов 192
каталог Картана простых групп Ли 123
катодные лучи 11, 16, 139, 141
квазары 178
квантовая космология 32, 69, 186, 239
— механика *см. также* квантовая электродинамика, квантовая теория полей, состояния 8, 17—19, 23—26, 30, 32, 34, 46, 54, 55, 57, 59-61, 249
63, 64, 66-72. 88, ПО, 112, 116. 119 138, 159. 165, 166, 169, 170, 175, 182, 185, 192, 221, 223, 224
— теория полей 136, 147, 166, 168
— хромодинамика 116, 143, 166, 185, 220
— электродинамика 105, 119, 135, 142, 161, 162, 171, 228, 233
квантовые состояния *см. состояния*
— флуктуации 175, 176, 178
кванты 24, 86, 154, 167
кварки 24, 25, 29, 49, 51, 52, 65, 115, 116, 142-144, 147, 151, 152, 156, 162, 168, 171, 183, 185, 204, 208, 229-231, 233-235, 237
КЕК лаборатория 145, 213
Кембриджский университет *см. также* Лукасовская кафедра 38, 139
кислород 28-31, 49, 124, 139, 172, 220, 238
классическая физика 55, 62, 69, 109, 225
Колумбийский университет 16, 88, 91, 205, 226
кольца Сатурна 32
комета Галлея 75, 76
— Энке 76
комплексные числа 223
компьютеры *см. также* параллельное программирование 27, 30, 38, 47, 128, 203. 211, 220, 221
конгресс 6, 9, 47, 65, 189. 205, 209—211, 215-217, 222, 242
—, слушания в комитете 47, 222
конец науки 19
константы природы 172—174, 179, 184, 186, 1%
— связи *см.* интенсивности взаимодействий конформная симметрия 169, 238
копенгагенская интерпретация квантовой механики 61, 62, 67, 68, 181
Копенгагенский институт теоретической физики 60
Корал Гейбл (университет в Майами) 92
Корвеллский университет 95, 127, 209
Король *Лир* 20
космическая станция 210, 211, 216
космические лучи 87, 119, 122
космический фон микроволнового излучения 32, 207
космологическая постоянная 174—179, -239
космология *см.* теория Большого взрыва, космический фон микроволнового излучения, космологическая постоянная, темная материя, скрытая масса, квантовая космология, красное смещение, модель стационарного состояния в космологии красное смещение 226
— — в космологии 178
— — гравитационное 226
красота в научных теориях 18, 19, 45 81 105-107, 117-119, 130, 152
креационизм 41, 43, 193
кривизна 73, 80, 81, 85, 12, 1, 230
кристаллы 29, 108
критические показатели 127
кратовые норы 173, 239

Лево- и правополяризованные состояния 98
лептоны и лептонное число 25, 162, 171
линейность 70—72
литий 31
логический позитивизм *см.* позитивизм
— порядок в природе 40
локальные симметрии *см. также* калибровочные симметрии 25, 115, 230
Лондонский университет 234
Лоуренсовская лаборатория в Беркли 233
Лукасовская кафедра 126, 181

Луна 13, 42, 75-77, 84, 124, 191, 222, 241
лэмбовский сдвиг 88—91, 227

Магнетизм железа 126

макροэкономика 53

Максвелла теория электромагнетизма 8, 19, 79, 95, 139

Манхеттенский проект 212

Манчестер 17

масса 18, 22, 28, 29, 34, 50, 80, 85, 86, 91, 94, 109, 112, 117, 122, 124, 140, 143, 152, 154—156, 158, 159, 161, 163, 167, 177, 178, 196, 207, 219, 220, 224, 231, 233—237

математика 13, 18, 47, 31, 106, 118, 122, 124

—, красота 106, 107

Математические начала натуральной философии (И. Ньютон) 14

матрицы и матричная механика 55, 57

Маунт-Вильсон 174, 226

медь, цвет сплавов 21—23, 219

мезоны 143, 144

мел 20-23, 26, 27, 29-31, 54, 181, 209, 212

меловой период 209

Меркурий, прецессия орбиты 74—76, 78, 81-83, 102

метафизика 136, 137, 144

250

механицизм и механистическая философия 133, 134, 136

Милет 11

министерство энергетики 203, 205, 206, 208, 209, 242

мнимая часть комплексного числа 223 224

молекулы *см.* атомы и молекулы

— сахара, киральность 98

молекулярная биология 48, 127, 191

«Морской волк», подводная лодка 210

Москва 173

МТИ (Массачусетский технологический институт) 227, 230

Мюнхенский университет 16

мюоны 87, 197

Наблюдательный комитет (постройки ССК) 209, 216

— совет по физике высоких энергий 205

намагничивание 155

Национальная академия науки и техники 209

Национальное бюро стандартов 71, 229

— научное общество 47

недостающая масса (в космологии) 177

неевклидова геометрия 121, 231

неизбежность в физических теориях 107, 108, 117

нейтрино 93, 97, 99, 114, 115, 135, 151, 152, 154-156, 162, 163, 229, 231, 235, 237

— в слабых взаимодействиях 97 — масса 162, 163, 234

— от Солнца 163 — открытие 102

— семейная связь с электроном в электрослабой теории 99

нейтрон 24, 28, 29, 38, 92-94, 99, 100, 112, 115, 116, 122, 123, 125, 135, 144, 166, 171, 172, 197, 207, 208, 220, 231, 233

— в слабых ядерных взаимодействиях 93

— в составе семейств 123, 231

— открытие 122

неоплатоники 130

нижний кварк *см.* кварки Нобелевская премия 82, 83, 97, 226 Новосибирск 101

номинализм 40

Норвич 20, 21, 29

Общая теория относительности 8, 52, 56, 69, 73, 74, 77-79, 81-83, 85, 102, 108, 113-115, 121, 135, 158, 159, 174, 175, 199, 222, 226, 227

объединение взаимодействий 147, 156

объективизм *см.* релятивизм

объективный редукционизм 222

объяснение 10, 11, 13, 20, 25, 26, 180

одновременность 79, 138

окончательная теория 6, 7, 131, 136, 137, 157, 165, 166, 168, 169, 180, 181, 183-187, 191, 213

округ Эллис, Техас 11, 43, 51, 109, 193, 194, 203, 209, 212-215, 227, 241, 242

Оксфордский университет 98—101, 228

Оптика (И. Ньютон) 14

О кусочке мела (речь Томаса Хаксли) 21

О небе (Аристотель) 12

О происхождении видов (Ч. Дарвин) 20

остинское меловое отложение 209, 212, 214

отклонение сдета Солнцем 74—78, 81

относительность *см.* общая теория относительности, специальная теория относительности

Парадигмы 144, 145

параллельное программирование 212

Париж 16, 101

Первые три минуты 198, 229

перенормируемые теории 91, 94, 117

планеты *см. также* Меркурий 12—14, 26, 30, 32, 34, 37, 41, 42, 56, 74, 81, 84, 109, 128, 129, 197, 219, 224

планковская масса 221

— энергия 158-161, 183

платоновские формы 40

побочный продукт *см.* технологический побочный продукт

позитивизм 65, 137-142, 195, 232

позитрон 86, 89-91, 102, 119, 120, 162, 163, 230

поля *см. также* электрические и магнитные поля, квантовая теория полей 16, 18, 151

поляризация света 98, 227, 236

постоянная Планка 57, 58, 60, 110, 224

постоянные магниты *см.* железо, намагничивание

предметный коррелят 39

предсказание и последующее подтверждение 11, 42, 63, 64, 69, 76-78

прецессия орбит *см.* Меркурий

— перигелия 225

приливная волна в заливе Пьюджет-

Саунд 37, 38 приливы 220, 222

«Принстонский струнный квартет» 169

Принстонский университет 25, 42, 47, 67, 71, 143

251
принцип Коперника 191 ~ относительности *см.* специальная теория относительности

— плодovitости 185, 186

— эквивалентности 80

принципы инвариантности *см.* принципы симметрии

— симметрии *см. также* калибровочные

симметрии, внутренние симметрии, локальные симметрии, спонтанное нарушение симметрии 8, 108, 109, 111, 116, 125, 147

природа 6, 11, 13, 14, 17, 25, 27, 30, 32-35, 40, 41, 43, 45, 46, 49, 53, 54, 56, 73, 83, 93, 108-110, 112, 113, 151

природная эволюция 193

проблема бесконечностей 18, 86-88, 90, 91, 96, 142, 159, 161, 169

— иерархии 160, 161, 163, 236

проекция Меркатора 81

простота в физических теориях 49, 107, 117, 118, 129, 175

протон 9, 14, 24, 28, 29, 50, 92, 93, 99, 100, 112, 115, 117, 122, 123, 125, 135, 144, 147, 162, 166, 183, 204-209, 215, 220, 231, 235

— в атомных ядрах 206

— в слабых ядерных взаимодействиях 93

— в составе семейств 123, 125

— в ускорителях 9

— распад 162, 163

Псалтырь 240

Работа трех авторов 86

радар 78, 79, 148

радиоактивность 16, 92, 95, 217

радиоастрономия 78, 79

рассеяние 86, 93, 97, 99, 100, 142, 159, 166, 235

расширение Вселенной 32, 127, 175—178, 207, 241

реализм 40, 68, 132, 148

реальность 40, 41, 64, 65, 132, 142, 148, 153, 227

редукционизм 19, 44-46, 48, 51, 63, 192, 222

религия 21, 41, 189, 193, 194, 197, 199, 200

релятивизм философский 144

ренормализационная группа 182, 222

рентгеновские лучи 16, 102

Самоуспокоенность, в физике XIX в. 16

сверхпроводимость 49, 50, 187, 222

Сверхпроводящий суперколлайдер (ССК) 8, 9, 46, 47, 160, 163, 183, 189, 203, 206-212, 214-218, 242

сверхсильные взаимодействия 156, 160, 204, 235, 236

свет *см.* цвет света, электрические и магнитные поля, фотон, длина волны света свободно падающие системы
отсчета 80, 81, 85
«Святое семейство» Рафаэля 107
Северный полюс 137, 180, 181
секунда (мера угла) 74, 76
сенатский комитет по энергетике и природным ресурсам 210, 216
Сибола, семь золотых городов 43
силы инерции 80
сильная программа (в социологии науки) 146
сильное ядерное взаимодействие 8, 93, 94, 122, 143, 150, 156, 157, 160, 163, 166, 167, 169, 181, 185, 205, 220, 231
синтез элементов 171, 172
синхротронное излучение 223
Сиракузы 13
система звездных войн 211
Сиэтл, университет штата Вашингтон 98-101
слабое ядерное взаимодействие 19, 41, 92, 93, 96, 98, 103, 142, 152, 156, 159, 165, 206, 229
слабый антропный принцип *см. также* антропный принцип 239
— нейтральный ток 97, 101
случайности *см.* исторические случайности
случайные законы сохранения 162
COBE *см.* спутник для исследования космического фона
сознание 11, 19, 38, 39, 73, 221
солнечная постоянная 1%
Солнечная система 22, 34, 69, 74-76, 81, 84, 85, 103, 109, 129, 134, 191, 192, 222, 240
солнечные затмения 74—77, 81, 83
Солнце *см.* отклонение лучей света,
красное смещение (гравитационное)
Сольвеевская конференция 88
соотношение неопределенностей *см.* Гейзенберг
состояния в квантовой механике 22—24
соударения частиц *см. также* рассеяние 133, 142, 143. 146, 204
социология науки 145, 234
252
спин 49. 64, 66, 71, 98, 109, 120, 122, 123, 153, 160, 167, 224, 230, 231
спонтанное нарушение симметрии 94, 151-157, 222
спутник для исследования космического фона (COBE) 207, 208
ССК *см.* Сверхпроводящий суперколлайдер
стандартная модель (элементарных частиц) 24, 25, 27, 29, 31, 150-153, 155. 156
статистическая механика 36, 139, 141
странные частицы 87, 102
стрелы объяснений 20, 30, 36, 33, 47, 181, 195
Стэнфордский университет 100, 101
— центр линейного ускорителя (SLAC) 145, 233
суперпрогонный синхротрон 206
суперсимметрия 160, 163, 208, 236, 237
суперструнные теории *см.* теория струн сферические скопления 177

Таблицы (в работе Гейзенберга) 55
таллий 100
тау-лептон 102, 197
теватронный коллайдер 210
телекинез 41—43
темная материя (в космологии) 177, 207, 208, 241
теодицея 195
теория Большого взрыва в космологии 31, 69, 136, 155, 207
— возмущений 171
— стационарного состояния в космологии 31
— струн 18, 137, 166-171, 176, 179, 184, 236-239
тепловое излучение 17, 26, 56
теплород 103 термодинамика *см. также* второй закон термодинамики 35, 36, 38, 40, 221
Техас 43, 51, 109, 193, 209, 212, 227, 242
Техасский университет 68, 71, 198, 219, 220, 239
техницветовое взаимодействие *см. также* сверхсильные взаимодействия 236
технологический побочный продукт 217, 223
Тимей (Платон) 128
точка Кюри 126, 127
Триест 95
турбулентность 19, 37, 187
Углекислый газ 29

- углерод 27-31, 124, 172, 220, 238
ультрафиолетовая катастрофа *см.* бесконечности, проблема универсалии 30, 35
уравнение Шрёдингера 58
ускоритель Ван де Граафа 231
— релятивистских тяжелых ионов 241
Утрехтский университет 96
Фазовые переходы 126, 127, 155
— — второго рода *см.* фазовые переходы
— — первого рода *см.* фазовые переходы
Ферми теория слабых ядерных взаимодействий 93, 94
Фермнлаб 97, 99, 101, 163, 204, 206, 213
физика элементарных частиц *см. также* электрон, фотон, кварки, стандартная модель и т. д. 8, 37, 40, 44-50, 96
Физики (Аристотель) 12
философия 13, 15, 69, 131—134
формула Венециано 166
Форт Уорт 203, 212
фотон 17, 22-24, 26, 48
— в квантовой электродинамике и квантовой теории поля 24,, 87, 92, 112, 120, 135
— в электрослабой теории 114
— теория Эйнштейна 26
фотоэлектрический эффект 83
Фредериксбург 103
- Хаос 32, 33, 37, 38, 51, 52
хиггсовская частица 154—156, 160, 163, 204
химия 12, 15, 17, 18, 29, 30, 38-40, 44, 46, 139, 141, 189
— молекулы водорода 12, 27, 139
холизм 45
хромодинамика *см.* квантовая хромодинамика
- Цвет кварков 116
цезий 100
центробежная сила 80, 113, 114
Церковная история Англии 202
ЦЕРН 9, 97, 99, 101, 163, 166, 206, 213, 237
циклотрон 206, 213
циклотронная лаборатория им. Невиса 205
253
Цукуба 41 Цюрих 58
- Черные дыры 35, 52, 127, 221
четность 102
Чикагский университет 15
- Шелтер Айленд, конференция 88—91
- Эволюция биологическая 12
Эйнштейна взгляды на квантовую механику *см. также* эксперимент Эйнштейна—Подольского—Розена, принцип эквивалентности, общая теория относительности, специальная теория относительности 79
— космология 174
— позитивизм 141
— религиозные взгляды 189
— теория броуновского движения 02
— формулировка специальной теории относительности 141
— — теории фотонов 56
эксперимент Эйнштейна—Подольского—Розена 71
элегантность, в математике 106
электрические и магнитные поля 16, 18, 24, 57, 59, 71, 86, 91, 114, 134, 142
электрический заряд 18, 22, 28, 95, 97, 114, 140, 220, 230
электромагнитное взаимодействие 147, 150, 153, 156, 157, 170, 204, 231
— поле *см.* электрические и магнитные поля
электрон 12, 13
— в квантовой механике *см. также* атомы и молекулы, бета-распад, дираковская теория электрона, квантовая электродинамика, квантовая механика 23, 30, 38, 87, 91
— в квантовой теории поля 24, 91, 135
— в электрослабой теории 114, 123
—, открытие 86, 139
электрон-вольт 14, 22, 110, 204
электрослабая теория *см. также* стандартная модель, слабое взаимодействие 95, 96, 98-100

энергия 8, 9, 14, 18
— атомов 18, 88
— в квантовой механике 110, 112
— вакуума 175, 176
— фотонов 22, 24, 88, 90, 142, 227
энтропия 35, 36, 220, 221
эпистемология 137, 144
эпициклы 103
эпоха эллинизма 13
эфир 17, 134
эффект Доплера 226
эффективные теории поля 168
Юрские горы 9
Ядра атомов *см. также* бета-распад, нейтрон, протон, радиоактивность, сильные взаимодействия, слабые ядерные взаимодействия 24, 31
ясновидение 41, 42

C. elegans 39
J-частица 233
J/ψ-частица 233
Mysterium cosmographicum (сочинение И. Кеплера) 129
S-матрица и S-матричная теория 142, 233
Scientific American 46
SU(3) симметрия 123
W-частицы 95, 99, 101, 102, 114, 115, 147, 151, 152, 154, 156, 234, 237
Z-частица 95, 97-99, 101, 114, 115, 153, 156, 206, 234, 236, 237
ψ-частица 233

Сканирование и форматирование: [Янко Слава](#) (Библиотека [Fort/Da](#)) || slavaaa@yandex.ru || yanko_slava@yahoo.com
|| <http://yanko.lib.ru> || Исq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - [вверху](#)
[update](#) 07.08.06
